机械工人学习丛书

电动机绕组改接与计算

姜孝定　编著

电工

03.1

机械工业出版社

一、三相感应电动机的基本原理

三相感应电动机由于结构简单、运行可靠、维护方便，而且效率高、重量轻、价格低，是现代生产中应用最广泛的一种动力机械。在工业方面，它被广泛应用于拖动各种机床、起重机、水泵等设备；在农业方面，它被应用于拖动排灌机械、脱粒机、粉碎机以及其它农副产品的加工机械等。

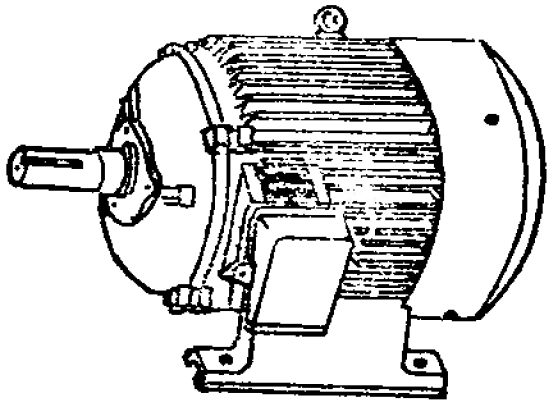
（一）三相感应电动机的结构

三相感应电动机主要由静止的定子和转子两大部分组成，外加端盖和风扇等附件。图1-1为常用的封闭式三相笼式转子感应电动机的结构。

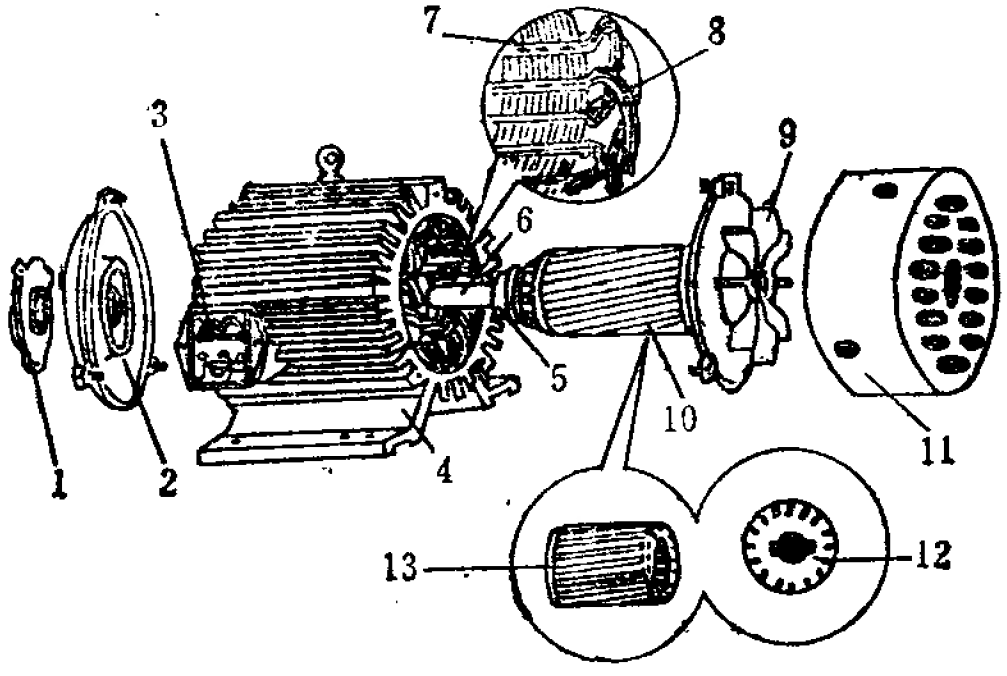
1．定子

定子由定子铁心、定子绕组和机[illegible]

定子铁心是电



a）



b）

图1-1　三相感应电动机的结构

a）外形图　b）结构部件图

1—轴承盖　2—端盖　3—接线盒　4—机座　5—轴承　6—转轴　7—定子铁心　8—定子绕组　9—风扇　10—转子　11—罩壳　12—转子铁心　13—鼠笼绕组

馆圖北藏書京
B 743944

机磁路的一部分，由0.5mm厚的硅钢片叠成，片间涂以绝缘漆，以减少涡流损耗。定子铁心内圆开有定子槽，槽内嵌放定子绕组。容量较大的感应电动机，定子铁心沿轴向分段，段与段之间设有径向通风沟，以利铁心的散热。

定子绕组是电机的电路部分，由许多线圈连接而成。线圈则由绝缘导线（高强度漆包铜线）绕制而成。每个线圈有两个有效边，分别嵌放在两个定子槽内，用竹签或胶布板做成的槽楔固定。线圈之间按一定规律连接，构成三相绕组。

中小型电动机的机座是整个电机的支承，承受运转过程中的各种作用力。为此，必须有足够的强度和刚度，一般用铸铁铸造。封闭式电动机的定子铁心紧贴在机座的内壁，电机在运转时由损耗产生的热量通过铁心传给机座，再由机座表面散发到空气中去。为了增加机座的散热面积，其表面铸有若干散热片。防护式电动机的机座上开有通风孔，外面的空气可以直接冷却电机内部。

2. 转子

三相感应电动机的转子分为笼式和绕线式两种类型，均由转子铁心、转子绕组和转轴三部分组成。

转子铁心也是电机磁路的一部分，同样由0.5mm厚的硅钢片叠压而成。铁心压装在轴上，较大的电机，转子铁心压在支架上，支架再装于轴上。转子铁心外圆开有转子槽，槽中放置转子绕组。

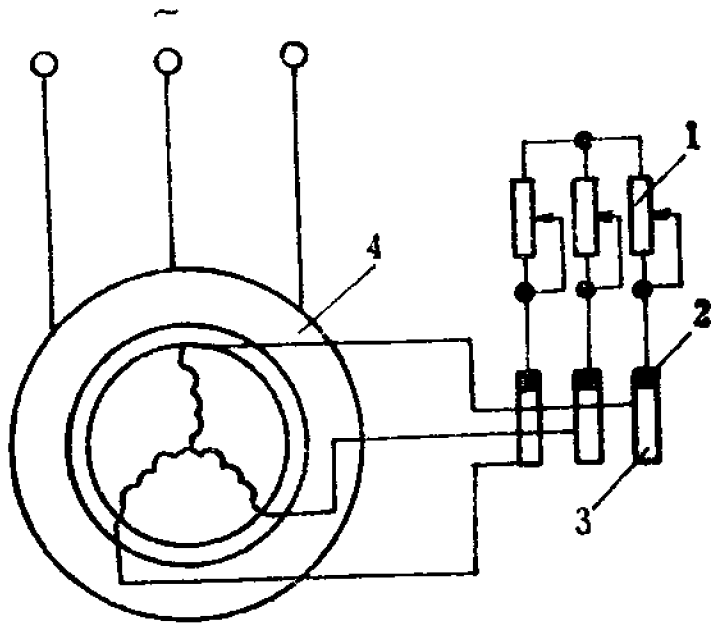


图1-2 绕线式感应电动机转子串接电阻

1—外接可变电阻 2—电刷 3—滑环 4—绕线式感应电动机

笼式转子的槽内放置裸导体，两端分别焊接在两个铜环（称为端环）上，这种转子绕组形似鼠笼，故称为鼠笼式转子，通称笼式转子。中小容量感应电动机的转子一般用熔化的铝铸满转子槽，同时铸出两端的端环和风扇叶片。绕线式转子的绕组和定子绕组一样也为三相绕组。转子绕组嵌放在转子槽内，接人形，三根引出线分别接到非轴伸端互相绝缘的三个滑环上，可以通过电刷将转子各相绕组与外接起动电阻或调速电阻连接，如图1-2所示。中等容量以上的电机装有提刷短路装置，在电动机起动完毕而又不需要调速时，可扳动手柄，将电刷提起，并将三个滑环短路，这样可以减少摩擦损耗和电刷的磨损。

转轴由成型圆钢加工而成，其作用是支承转子铁心并传递转矩，需要有一定的强度和刚度。

3．端盖及其它附件

中小型感应电动机有铸铁制成的端盖，内装滚珠或滚柱轴承，用以支承转子，保证定、转子之间有均匀的气隙。为了减小电机磁路的磁阻，从而减小励磁电流，提高功率因数，感应电动机定子与转子之间的气隙应尽可能做得小些，但考虑到机械加工的误差、轴承的磨损、单边磁拉力等因素，气隙也不能太小，一般中小型感应电动机的气隙为0.2～2mm左右。

为了使轴承中的润滑脂不受污染和外溢．前、后轴承均设有内、外轴承盖。

封闭式感应电动机后端盖外装有风扇和外风罩，风扇随转子旋转时，风由风罩上的进风孔进，由风扇扇向散热片，以加强冷却。

（二）旋转磁场的形成

三相感应电动机定子绕组接通三相电源后，即能在空间形成以一定转速旋转的旋转磁场。由于旋转磁场与转子导体之间有相

互切割作用，转子导体中便产生感应电势和电流。转子导体中的电流与磁场相互作用，产生电磁力和电磁转矩，使转子能按旋转磁场的方向转动起来，因此，旋转磁场是感应电动机工作的基础。

图 1-3 为一最简单的定子三相绕组，每相只有一个线圈，分别以 A-X、B-Y、C-Z 表示，它们在空间彼此相隔120°。若将三相绕组按人形连接后接到三相电源上，三相绕组内就会流过三相对称电流，其波形如图1-4所示。三相电流的数学表达式为

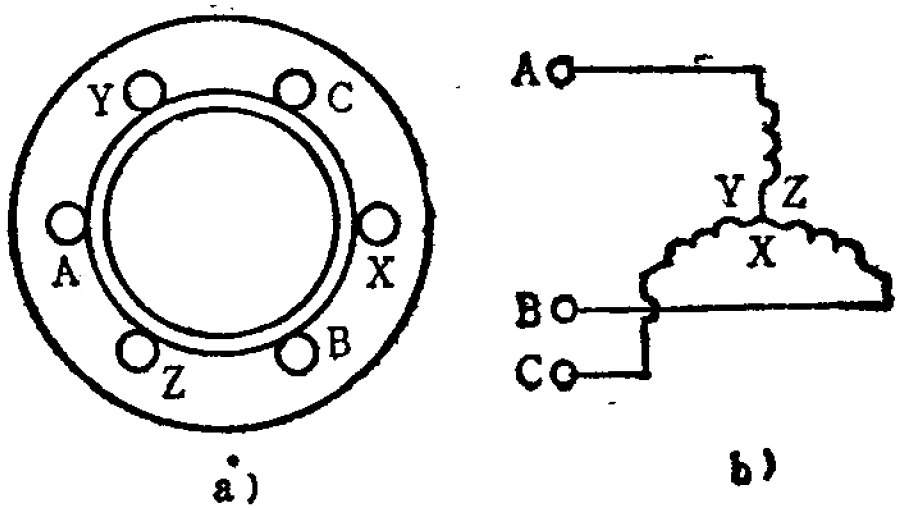


图1-3　三相定子绕组

$$\left.\begin{aligned} i_a &= I_m \sin\omega t \\ i_b &= I_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ i_c &= I_m \sin(\omega t - 240^\circ) \end{aligned}\right\} \qquad (1\text{-}1)$$

每相绕组电流都将产生磁场，三相绕组电流将共同形成一个合成磁场。下面将以几个特殊的时刻为例子用作图的方法来证明此合成磁场是一旋转磁场。

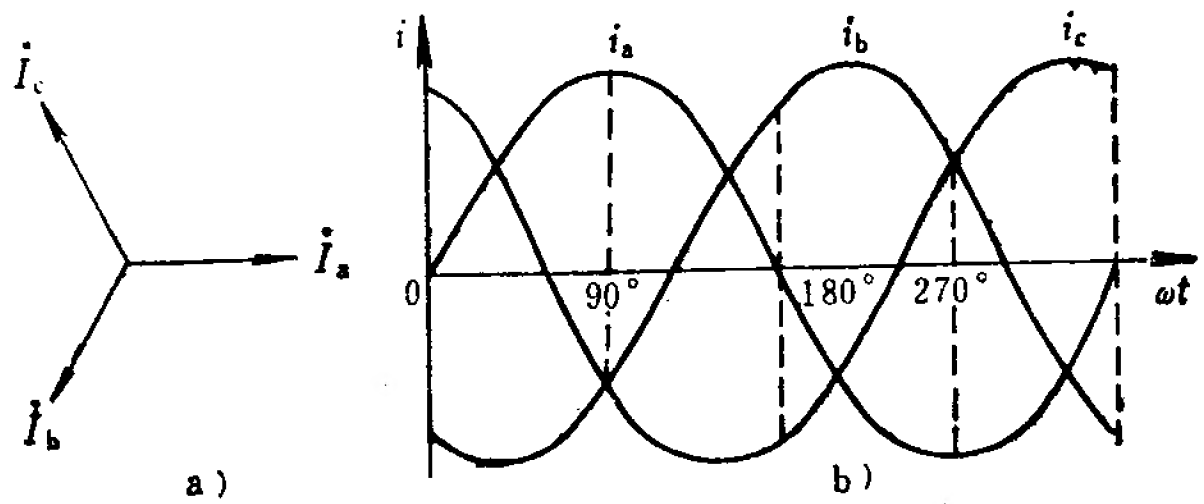
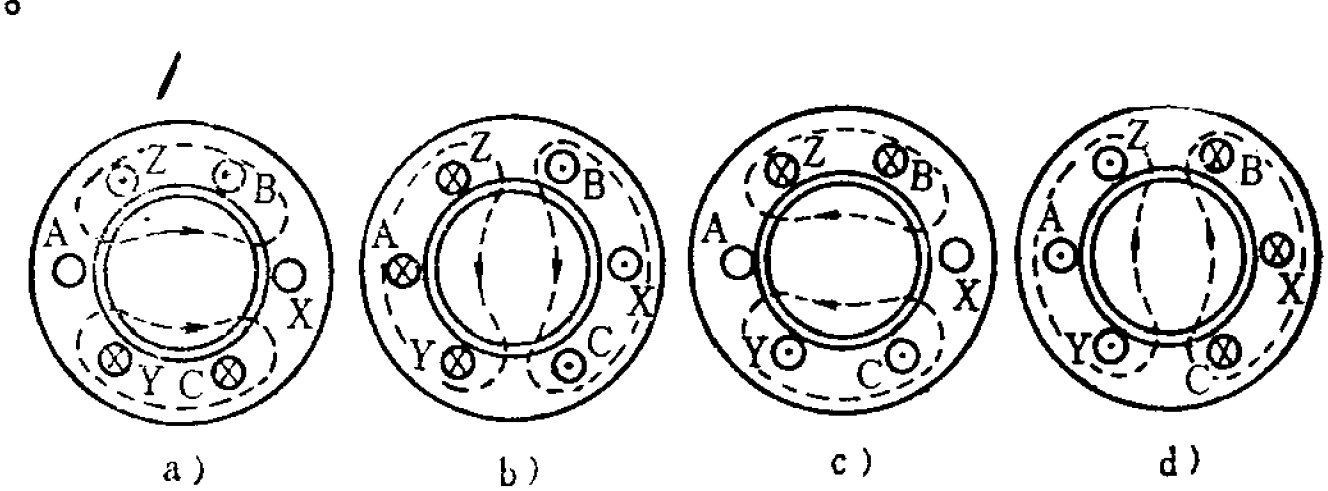


图1-4　三相正弦交流电流

a）相量图　b）波形图

为分析方便，假定每相绕组电流的正方向是从首端A、B、C流入（用⊗表示），从尾端X、Y、Z流出（用⊙表示）。当电流为正值时，表示电流的实际方向与假定的正方向相同；电流为负值时，表示电流的实际方向与假定的正方向相反。磁场的方向则根据电流的流向按右手螺旋定则来确定。

当$\omega t = 0$时，由式(1-1)或图1-4可知：$i_a = 0$、$i_b = -\sqrt{\frac{3}{2}} I_m$、$i_c = \sqrt{\frac{3}{2}} I_m$，将各相电流方向表示在各相线圈的剖面图上，B相电流为负值，从Y流入，由B流出；C相电流为正值，从C流入，由Z流出，如图1-5 a所示。按右手螺旋定则可以确定合成磁场的方向向右。用同样的方法可以作出$\omega t = 90°$、$\omega t = 180°$、$\omega t = 270°$这三个特定瞬间的电流和合成磁场的方向，分别如图1-5 b、c、d所示。



a）　b）　c）　d）

图1-5　三相感应电动机的旋转磁场

a）$\omega t = 0$　$i_a = 0$　$i_b = -0.866 I_m$　$i_c = 0.866 I_m$

b）$\omega t = 90°$　$i_a = I_m$　$i_b = i_c = -0.5 I_m$

c）$\omega t = 180°$　$i_a = 0$　$i_b = 0.866 I_m$　$i_c = -0.866 I_m$

d）$\omega t = 270°$　$i_a = -I_m$　$i_b = i_c = 0.5 I_m$

分析比较图1-5的a、b、c、d可以看出，三相绕组电流形成的合成磁场是随时间在空间旋转的磁场，故称之为旋转磁场。每当ωt变化了90°，磁场就按顺时针方向在空间转过90°；当ωt变

化了360°时，电流变化了一个周期，磁场也就重新回到原来的位置。这说明在两极电机中，电流变化一个周期，旋转磁场在空间也正好转过一圈，即360°。电流每秒钟变化 f 周（称为电流的频率），则旋转磁场每秒钟在空间也转过 f 圈。我国交流电的频率为 $f=50\text{Hz}$，所以两极感应电动机旋转磁场的转速为

$$n_1 = f = 50 \quad \text{r/s}$$

或

$$n_1 = 60f = 3000 \quad \text{r/min}$$

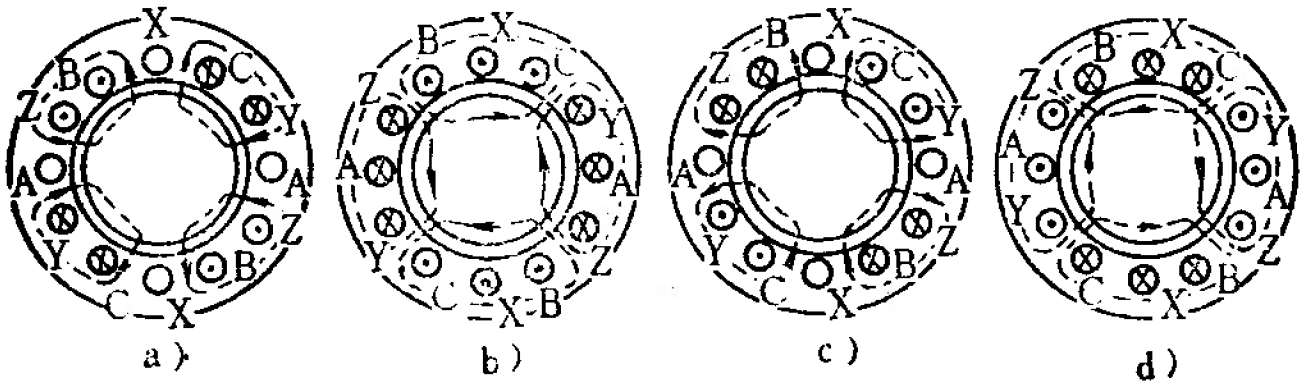


图1-6　四极电机的旋转磁场

a）$\omega t=0$　b）$\omega t=90°$　c）$\omega t=180°$　d）$\omega t=270°$

如果将三相绕组按图1-6安排，图1-6 a 画出了 $\omega t=0$，$i_a=0$、$i_b=-\frac{\sqrt{3}}{2}I_m$、$i_c=\frac{\sqrt{3}}{2}I_m$ 时的电流和磁场的分布情况，它为一四极磁场。当 ωt 每经过90°，从图1-6可以看出磁场相应地在空间按顺时针方向转过45°。电流变化了一个周期（即 ωt 经过360°），磁场在空间旋转了半圈。对于频率 $f=50\text{Hz}$ 的电流，四极电机旋转磁场的转速 $n_1=\frac{f}{2}=25\ \text{r/s}$ 或 $n_1=\frac{60f}{2}=1500\ \text{r/min}$，它是两极旋转磁场转速的一半。

只要适当地安排绕组，便可得到三对极、四对极或 P 对极的旋转磁场。按照前述的方法分析，同样可以求得它们的转速。三

对极时，$n_1=\frac{60f}{3}=1000$ r/min；四对极时，$n_1=\frac{60f}{4}=750$ r/min……。当电机为 p 对极时，其旋转磁场的转速为

$$n_1=\frac{60f}{p} \quad \text{r/min} \tag{1-2}$$

如果将接入定子绕组的三相电源任意两相对调一次，例如，将B、C两相对调，如图1-7所示，原来磁场按顺时针方向旋转图1-5，现在便按逆时针方向旋转了，即改变了磁场的旋转方向。

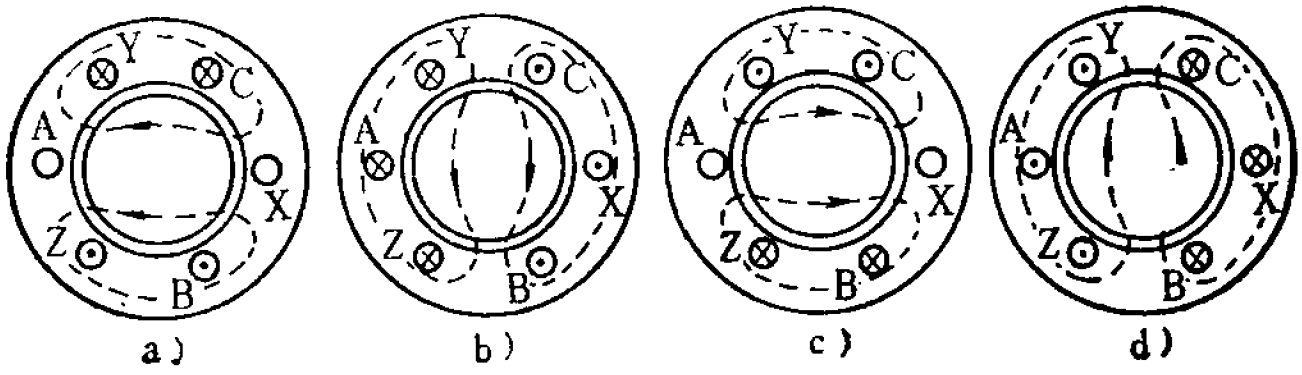


图1-7　改变磁场的旋转方向

a）$\omega t=0$　b）$\omega t=90°$　c）$\omega t=180°$　d）$\omega t=270°$

（三）三相感应电动机的工作原理

将三相感应电动机的定子三相绕组接通三相电源，流过三相电流，在电机中便形成转速为n_1的旋转磁场，如图1-8所示。

当磁场以n_1的转速逆时针方向旋转时，转子对磁场具有反方向的相对转速，使得转子导体切割磁力线产生电势，其方向按右手定则判断，在N极下转子导体电势方向为⊗，而在S极下为⊙，如图1-8所示。由于转子绕组自成闭合回路，在转子导体中便有

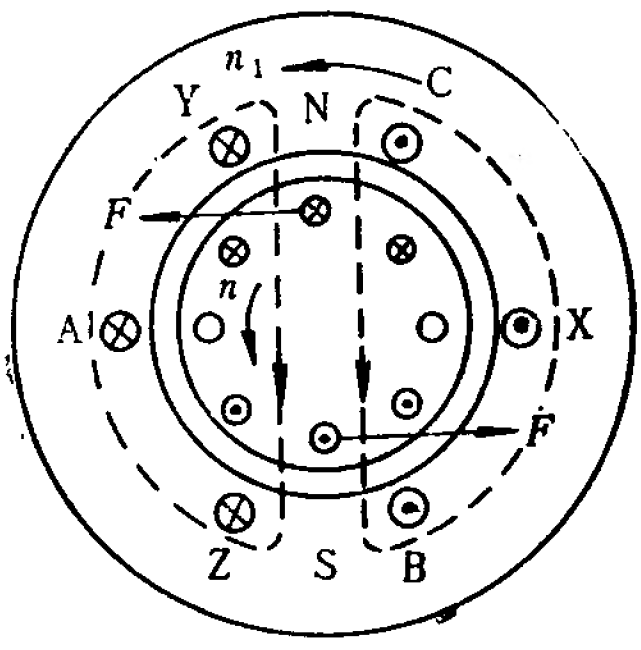


图1-8　三相感应电动机的工作原理

电流流过，其方向与电势方向相同。转子导体中的电流与气隙中的磁场作用，产生电磁力，形成电磁转矩，带动感应电动机的转子旋转。电磁力的方向按左手定则判断，在N极下，转子导体产生的电磁力向左，而在S极下则向右。此电磁力对转轴产生一逆时针方向的电磁转矩，转子则在电磁转矩的作用下，沿逆时针方向即沿着旋转磁场的方向转动起来。

转子的旋转速度 n 越快，转子导体与定子旋转磁场的相对转速（$n_1 - n$）就越小，转子导体因切割旋转磁场的磁力线而产生的电势和电流也就越小。若转子转速 n 正好等于旋转磁场的同步转速 n_1（旋转磁场的转速也称为同步转速），转子导体与旋转磁场之间便没有相对运动，于是转子导体上就不会产生电势和电流，也就不会产生电磁力和电磁转矩了。但是电动机即使在没有外加负载的情况下（空载运行时），它的风扇和轴承也有一定的摩擦阻力，转子铁心和转子绕组都要损耗一定功率，损耗的功率将产生阻力转矩，迫使转子转速 n 必须略低于同步转速 n_1，以便转子导体中产生一定的电势和电流，形成一定的转矩来克服阻力转矩。这种转速之差通常用同步转速 n_1 的百分率表示，称为转差率或滑差，以 s 表示。

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \times 100\% \qquad (1\text{-}3)$$

电动机空载时，由于空载阻力矩很小，转差率 s 一般只有0.4～0.7%，因此，转子转速非常接近同步转速。

当电动机拖动机床设备工作，即电动机有了外加机械负载时，阻力转矩增大，于是转子转速相应下降，转差率 s 增大，转子绕组中的电势和电流、电磁力和电磁转矩也增加，增加的旋转转矩刚好克服被带动的机械负载的阻力转矩，使电动机稳定运行。

从力学的基本知识可知，转速×转矩＝功率，这时，电动机就对外加负载输出了机械功率；与此同时，由于转子绕组中的电

流增大，通过对气隙旋转磁场的相互作用，使定子绕组中的电流也相应增加，换句话说，电动机从电源线路中吸取的电功率也相应地增加了。感应电动机就是这样将电能转换为机械能的。

对于一般中小型感应电动机，在铭牌上所规定的额定电压和额定负载情况下，额定转差率约为 2～7 %。

由于这种电动机的转子转速一般都在低于同步转速的情况下运行，因此是一种异步电动机。感应电动机的转子绕组不直接与电源线路连接，而是靠旋转磁场的电磁感应作用来产生机械功率，因此称为感应电动机。

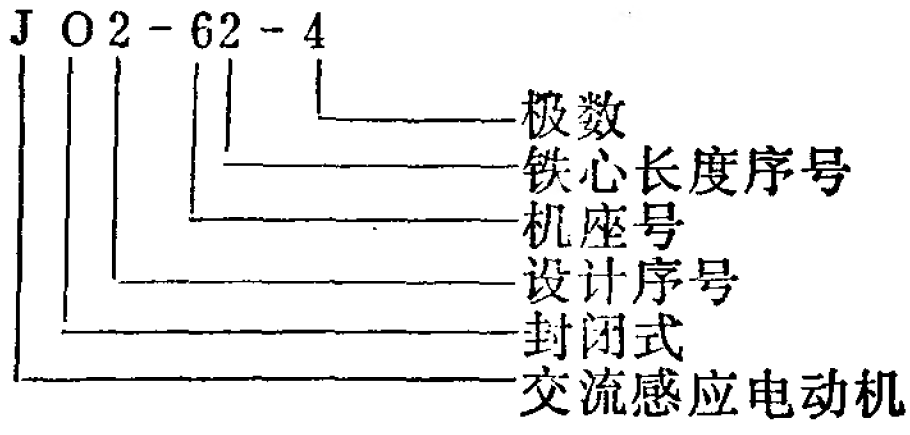
感应电动机的转子是顺着旋转磁场的方向旋转的，因此，如果需改变电动机的旋转方向，只需要改变旋转磁场的旋转方向，即将定子绕组的任意两相对调一下接入电源，便可达到改变转子转向的目的。

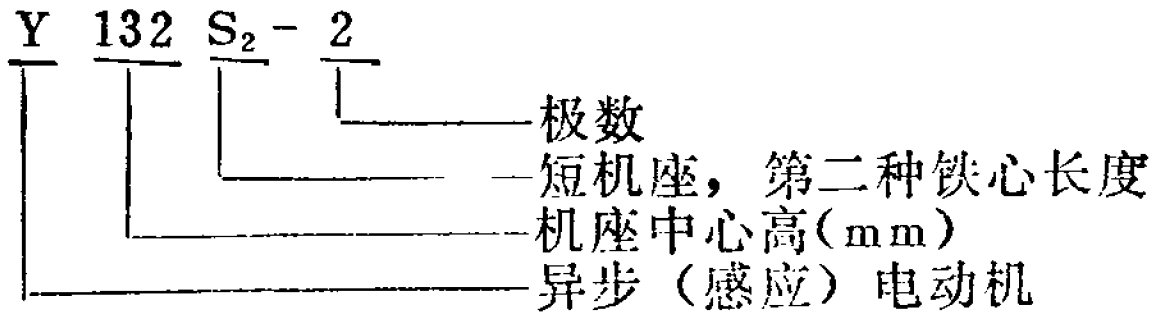
（四）电动机的铭牌数据

铭牌安装在电动机的外表面显著的地方，是电动机的主要标志元件。铭牌上载明电机的简要数据，以便用户正确选择和使用电机。在电机维修时，铭牌数据是绕组重绕计算的重要依据，所以，我们必须正确地了解铭牌。

铭牌上所列的一些主要项目说明如下：

型号　表示电机防护型式和转子类型等而引用的一种产品代号。例如





功率　表示在满载运行时电动机轴上所输出的机械功率，亦称额定功率或容量，以千瓦（kW）或瓦（W）为计算单位。

电压　亦称额定电压，指接到电动机定子绕组上的线电压，单位为伏（V）。电压变动一般不应超过铭牌规定的±5%。电压过高或过低都可能引起电动机过热。电压过低还会造成起动困难。

电流　亦称额定电流，指电动机在额定电压下达到额定功率时流入定子绕组的线电流，以安（A）为单位。

接法　表示在额定电压下，电动机三相绕组连接方式(星形或三角形)。一般电动机三相绕组的首末端均引到出线板上，如图1-9所示。三相绕组可以接成星形（人）或三角形（△），但必须按铭牌上规定的接法连接，才能正常运行。如规定为星形连接而错接成三角形，则电动机绕组很快就会烧坏；反之，如规定为三角形连接，而误接成星形，则电动机输出功率就会降低很多，甚至不能带负载运行。

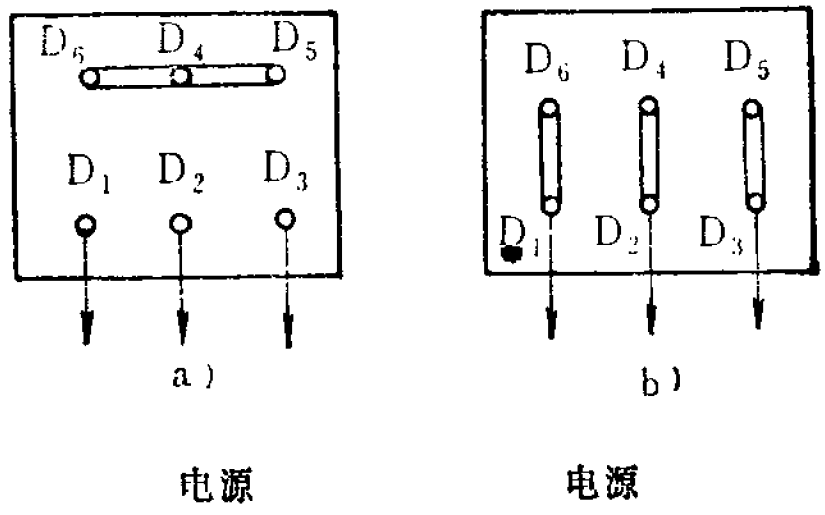


图1-9　出线板接法

a）人形接法　b）△形接法

转速　指在额定电压、标准频率和输出额定功率情况下，电动机每分钟的转速。

频率　我国工业电源标准频率为50赫（Hz）。

绝缘等级　绝缘等级与电机元件温升有关。中小型电动机的绕组绝缘有A级、E级、B级和F级。有些电机铭牌上标明允许温升而不标明绝缘等级。绝缘等级与电机允许温升关系见表1-1。

表1-1　电机容许温升与绝缘等级关系

绝缘等级	A	E	B	F	H
绝缘材料容许温度（℃）	105	120	130	155	180
电机容许温升(℃)	60	75	80	100	125

运行方式　连续运行是指电动机在铭牌规定的情况下可以连续不断地运行。一般电动机都是连续运行。但对特殊用途的电机，还有“断续运行”和“短时运行”等运行方式。

技术条件　指生产电机所必须遵循的技术规定。

一般说来，铭牌数据反映了电机的一定特征和工作能力。在铭牌规定的额定情况下，可以保证电机的正常运行和正常使用寿命。

二、三相绕组

从感应电动机的工作原理可知，不论从电能转换成机械能以供给机械负载，还是通过电磁感应产生电磁力和电磁转矩，以拖动机械负载，都离不开定子绕组。三相感应电动机的定子绕组是三相绕组。

（一）绕组的基本概念

1．线圈（绕组元件）

在制造和修理电机的绕组时，都是先用绕线模把导线绕成线圈，然后按照一定规律把线圈嵌入铁心槽内，再连接成绕组。由

于线圈是组成绕组的元件，所以又称为绕组元件。线圈可以是单匝或多匝的，如图2-1所示。

线圈放在槽内的直线部分是线圈的有效部分，称为有效边。能量转换主要通过该部分进行。在槽外的部分称为端部，它的作用仅是把线圈的两个有效边连接起来，不转换能量。为了节省材料，在不影响工艺操作的情况下，端部应尽可能缩短些。

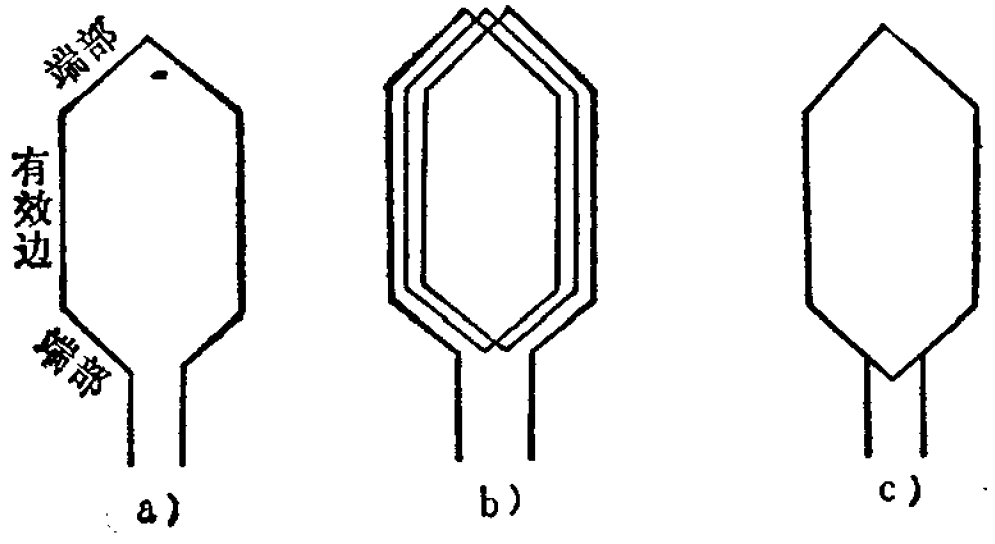


图2-1 线圈（绕组元件）
a）单匝线圈 b）多匝线圈
c）多匝线圈简化图

2. 极距

极距是指沿定子铁心内圆每个磁极所占的范围，用长度表示为

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} \quad (\text{mm})$$

式中 D——定子铁心的内径（mm）；

$2p$——磁极数。

极距也可用每极所占的槽数表示

极距

$$\tau = \frac{Z_1}{2p} \quad (\text{槽})$$

式中 Z_1——定子铁心的总槽数。

3. 电角度

一台电机定子铁心的端面是一个圆，从几何的角度来说可分为360°，这样划分的角度称为机械角度。但从磁场来看，一对极

便是一个交变周期。我们把一对极（即一个N极，一个S极）而对应的机械角度定为360°电角度。如果电机有 P 对极，则

$$\text{电角度} = P \times \text{机械角度}$$

在图2-2中，我们将电机沿气隙展开，一个圆周用360°机械角度表示。不论电机的极数是多少（图中是四极），一个极对应180°电角度，一对极对应360°电角度，电机一个圆周对应 P ×360°电角度。

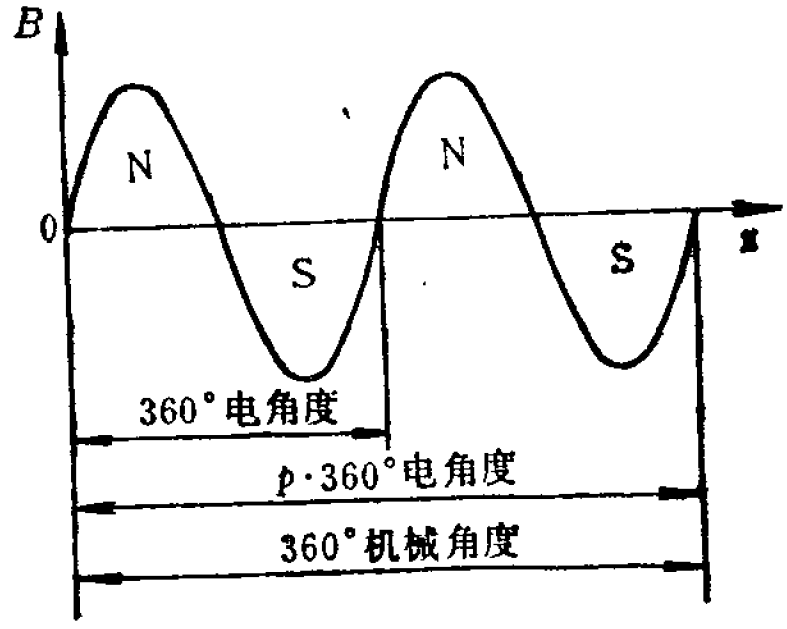


图2-2　电角度与机械角度的关系

4. 线圈的节距

一个线圈的两个有效边之间所跨的槽数为线圈的节距，用符号 y 表示。线圈的节距一般总是等于或稍小于极距。如果节距 y 与极距 τ 相等，称为整距线圈；如果节距 y 小于极距 τ，则称为短距线圈。

5. 单层及双层绕组

感应电动机常用的绕组型式可分为单层绕组及双层绕组两大类。单层绕组在每槽中只安放一个线圈边，而一个线圈有两个线圈边，因此电机中总的线圈数等于总槽数的一半。双层绕组每个槽中安放两个线圈边，其间用绝缘隔开，故每个线圈的两个边总是一个在某一槽的上层，而另一个则在另一槽的下层，如图 2-3 所示。采用双层绕组时，电机的线圈数等于槽数。单层绕组及双层绕组又有多种型式。

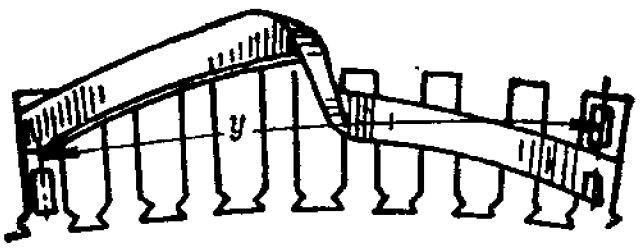


图2-3　双层绕组端部

（二）三相绕组的构造原则

三相绕组中通入的是三相对称电流，从图1-5及图1-6中可以看出，不论是两极电机还是四极电机，三相绕组的线圈A-X、B-Y、C-Z的始边（A、B、C）及末边（X、Y、Z）都是沿着圆周依次间隔地排列，它们的顺序都是A、Z、B、X、C、Y。各个线圈的始边A、B、C都间隔120°电角度。同时，由于三相对称电流的相位互差120°，从图1-4可以看出，在任何瞬间，三相电流或是两相为正、一相为负；或是两相为负、一相为正；或是一相为正、一相为负、一相为零。当规定电流为正时，从绕组的始边（A、B、C）流入，而从末边（X、Y、Z）流出；电流为负时，则方向相反。这样，不论在任何瞬间，按图1-5规律排列的定子绕组中通入三相电流时，电流的流向总是在半个圆周范围内流入，而在另半个圆周范围内流出，从而产生两极磁通。按图1-6规律排列的定子绕组通入三相电流时，电流的流向总是在四分之一圆周内流入，而在相邻的四分之一圆周内流出，从而产生四极磁通。

图1-5及图1-6所示的是最简单的三相绕组，两极电机仅有6个槽、3个线圈；四极电机仅有12个槽、6个线圈。每相在每极下都只占一个槽。实际上电机的槽数较多，例如较常见的有两极24槽以及四极24槽或36槽电机。这时三相绕组在铁心槽中的分布规律仍然不变，只是每相绕组在每极下所占的槽数有所增加。由此可得出三相绕组的构造原则和每相绕组的排列步骤：

（1）每相绕组所占的槽数应相等，并且在圆周上均匀分布。依照所要求的极数$2p$，把定子槽数Z_1分为$2p$等分，每一等分所包含的槽数$\frac{Z_1}{2p}$便是以槽数表示的极距。然后再将每一极距下的槽数三等分，分别放置三相绕组的线圈边。因此，每相绕组

在每个极下所占据的槽数为

$$q = \frac{Z_1}{2P \times 3} = \frac{Z_1}{6P}$$

称为每极每相槽数。

每相绕组在每个极面下所占的宽度（用电角度或槽数表示），称为相带。因为一个极距占180°电角度，每个相带占1/3极距，对应为60°电角度。因此，按上述规律安排的绕组称为60°相带绕组。

（2）各相绕组在空间应相互间隔120°电角度。为此，我们将按上述原则划分的相带依次标注A、Z、B、X、C、Y，这样，各相绕组线圈的始边A、B、C间都正好相互间隔120°电角度。

按照上述规律分别画出两极24槽以及四极24槽与36槽时三相绕组的分布情况，如图2-4 a、b、c所示。图中，每个槽内画了一根导体代表线圈的一个边，并且把各个槽中的导体按顺序编了号。图2-4 a所示的两极电机，整个圆周共分为6个相带，每个相带占60°电角度。每个相带所占的槽数，即每极每相槽数 $q = \frac{24}{2 \times 3} = 4$。图2-4 b、c所示的四极电机，整个圆周共划分为12个相带，由于四极电机整个圆周为 $P \times 360^\circ = 2 \times 360^\circ = 720^\circ$ 电角度，所以每个相带仍是60°电角度。$Z_1 = 24$时，每极每相槽数 $q = \frac{24}{4 \times 3} = 2$；$Z_1 = 36$时，$q = \frac{36}{4 \times 3} = 3$。在图中同时标出了代表每相绕组始边及末边所占相带的字母，并画出了当i_a为正，i_b、i_c为负时的电流流向——i_a由相带A处各线圈的始边流入，从相带X处流出；i_b及i_c分别由相带Y、Z处流入，而从B、C处流出。由图可见，槽数虽然增多了，但图2-4 a中的电流方向，在半个圆周内都是流入，而另半个圆周内则为流出，仍产生

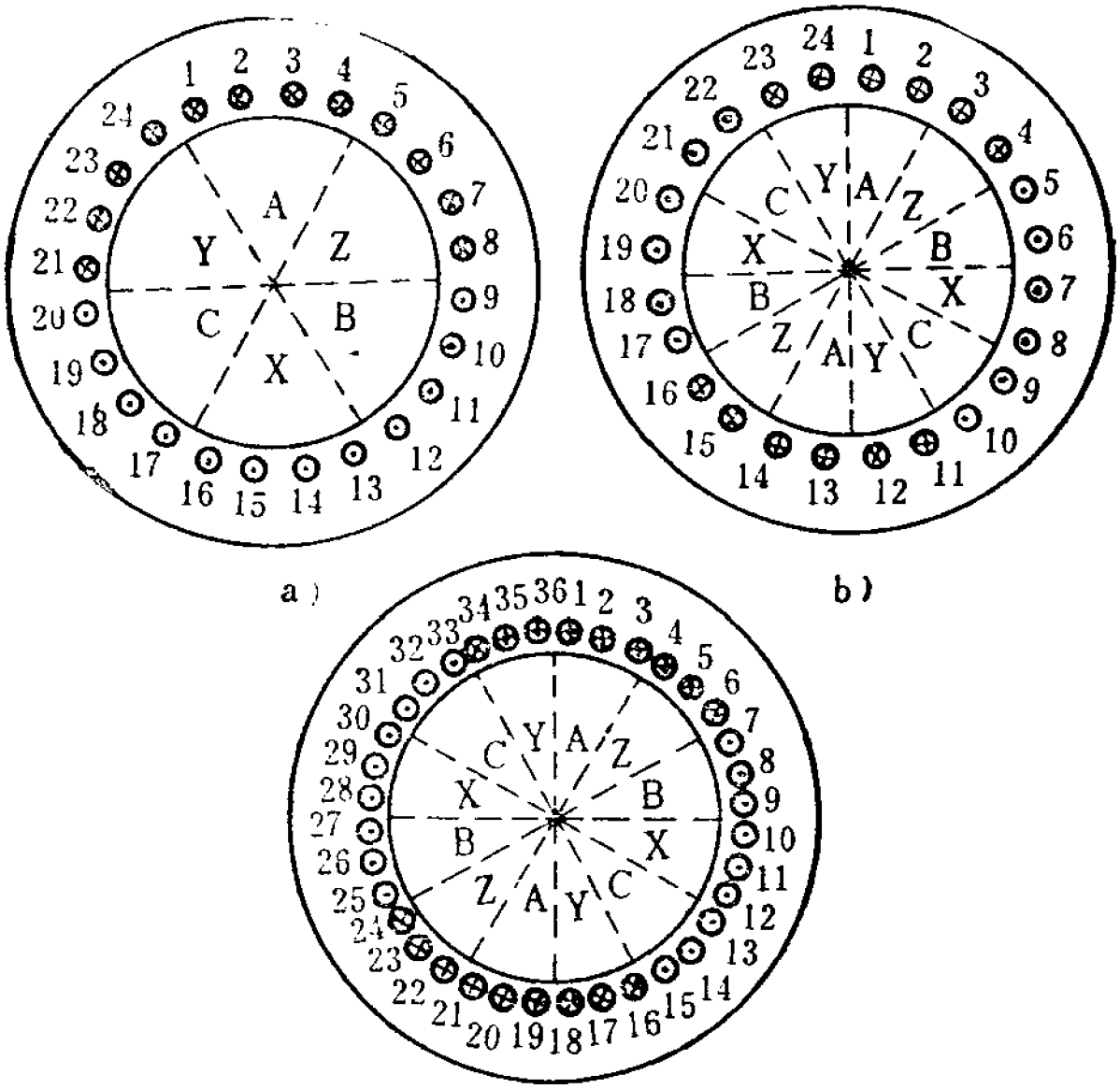


图2-4　三相绕组的排列

a）两极24槽　b）四极24槽　c）四极36槽

两极磁通。在图2-4 b、c中，1/4圆周范围内的电流方向一致，并与相邻的1/4圆周范围内电流方向相反，仍产生四极磁通。

上面分析了铁心圆周上的电流分布与所产生的磁通的关系。只要保持铁心圆周上电流分布的情况不变，它们产生的磁场情况也不会改变。我们顺着图中各槽导体的电流方向，分别把属于各相的导体连接起来，便可得到三相绕组。在保持电流分布不变的情况下，端部连接的方法可以不同，因而就构成了不同型式的单层绕组。

（三）三相单层绕组

1. 等元件式整距绕组

从图2-4 b所示的四极24槽三相绕组的分布情况可以看出，A相绕组的相带A包含导体1、2、13、14，相带X包含导体7、8、19、20。由于相带A中的电流方向与相带X中的电流方向相反，因此，相带A中的任何一根导体与相带X中的任何一根导体都可以组成一个线圈，而不会影响绕组产生磁场的性质。若选取 $y = \tau = 6$（槽），即将导体1与导体7组成线圈1，导体2与导体8组成线圈2；同样，导体13、14分别与导体19、20组成线圈13及14，其端面图如图2-5 a所示。为了说明这4个线圈的具体连接方法，可以设想把电机定子铁心在1与24槽之间切开展平，这样就可以画出绕组的展开图，如图2-5 b所示。由于线圈的节距

图2-5　等元件式整距绕组

a）端面图　b）一相绕组展开图（串联）　c）一相绕组展开图（并联）

相等，且等于极距，故称为等元件式整距绕组。在端面图中，导体电流的方向流入的，在展开图上电流方向以向上的箭头表示；流出的则以向下箭头表示。

在图2-5 b 中，我们顺着电流方向先把线圈 1 与线圈 2 串联成一线圈组，线圈13与14串联成另一线圈组，然后，顺着电流方向把两个线圈组的尾与头相串联成为 A 相绕组。也可以将这两个线圈组并联，为了保持电流分布情况不变，应将头与头相连、尾与尾相连，再引出接线，如图2-5 c 所示。为了清楚起见，展开图中仅画出单匝线圈。

从图2-4 b 中我们知道：导体5、6、11、12、17、18、23、24属于 B 相，导体3、4、9、10、15、16、21、22属于 C 相。按照图 2-5 a 与 b 同样的规律可以画出 B 相及 C 相绕组的端面图和展开图。再将三相绕组的展开图合并绘于图 2-6 所示的三相绕组展开图。

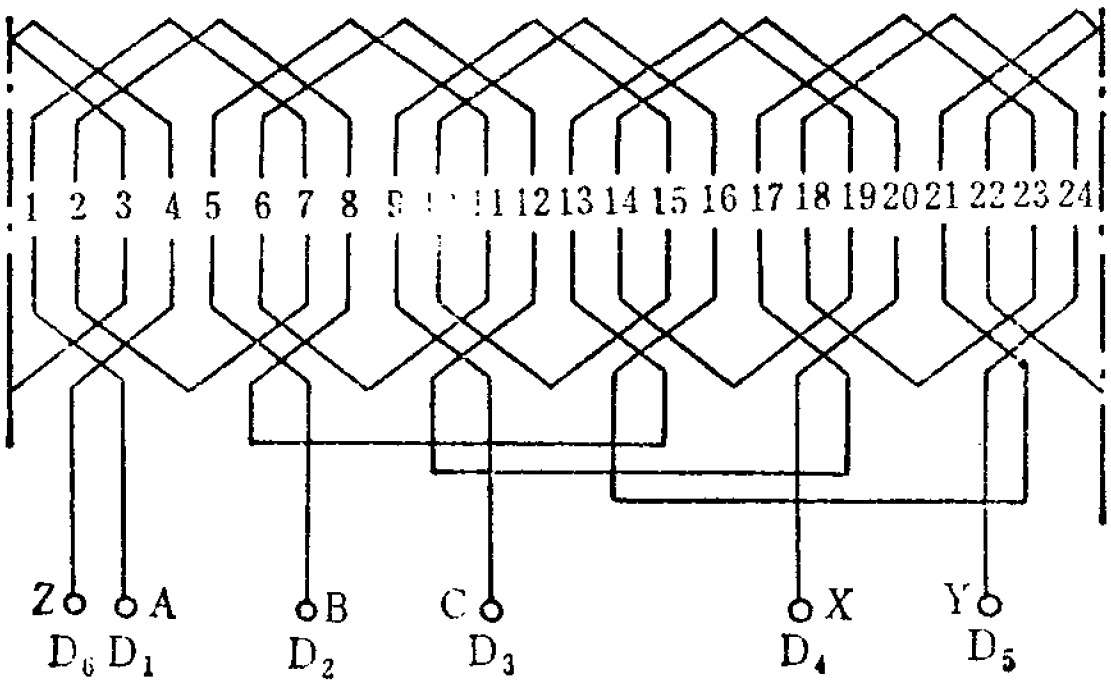


图2-6　等元件式整距绕组展开图

每相绕组的引出线的始端 D_1、D_2、D_3 分别从各相绕组的线圈始边 A、B、C 的相带处引出，例如，A 相绕组的引出线 D_1 自

相带A处的第1槽引出，B相引出线D_2自相带B处的第5槽引出，C相引出线D_3自相带C处的第9槽引出。引出线D_1、D_2、D_3之间相互间隔120°电角度。引出线的末端D_4、D_5、D_6分别从线圈末边X、Y、Z的相带处引出。

三相绕组可以接成星形，也可以接成三角形。接成星形时应将各相绕组引出线的末端D_4、D_5、D_6接在一起，如图2-7 a所示。接成三角形时，每相绕组的末端与另一相绕组的始端相接，如图2-7 b所示。

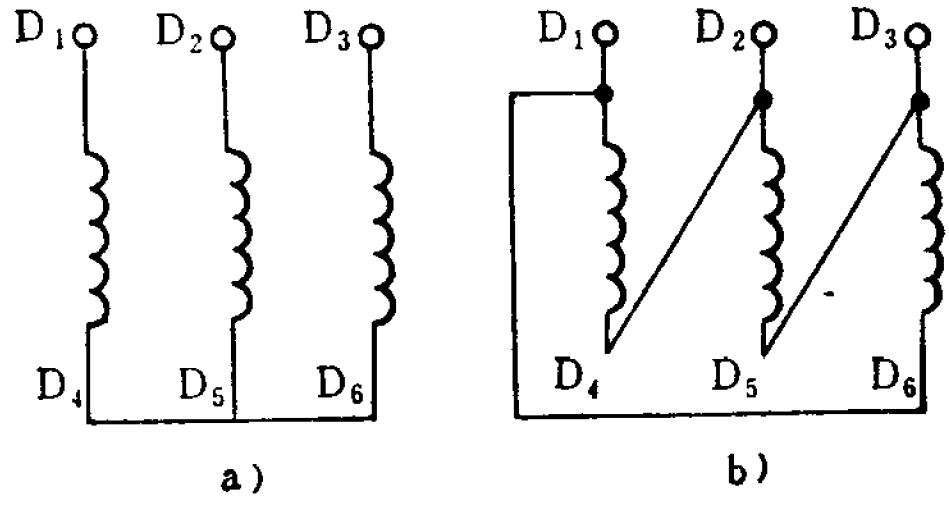


图2-7　三相绕组的连接

a）星形连接　b）三角形连接

2. 同心式绕组

按照图2-4 b所示的电流分布情况，我们把导体1与导体8组成一个节距为7的大线圈，将导体2与7组成一个节距为5的小线圈，然后顺着导体中的电流方向把这两个线圈串联成一个线圈组；同样，将13与20、14与19串联成一个线圈组，再将这两个线圈组顺着电流的方向串联起来，就构成了A相绕组。其端面图及展开图如图2-8 a及b所示。也可将这两个线圈组并联起来，如图2-8 c所示。

由于同一个线圈组中两个线圈的中心重合故称为同心式绕组。按照同样的方法，可分别画出B相及C相的同心式绕组展开图。然后把三相绕组的展开图合并，即得如图2-9所示的三相绕组展开图。

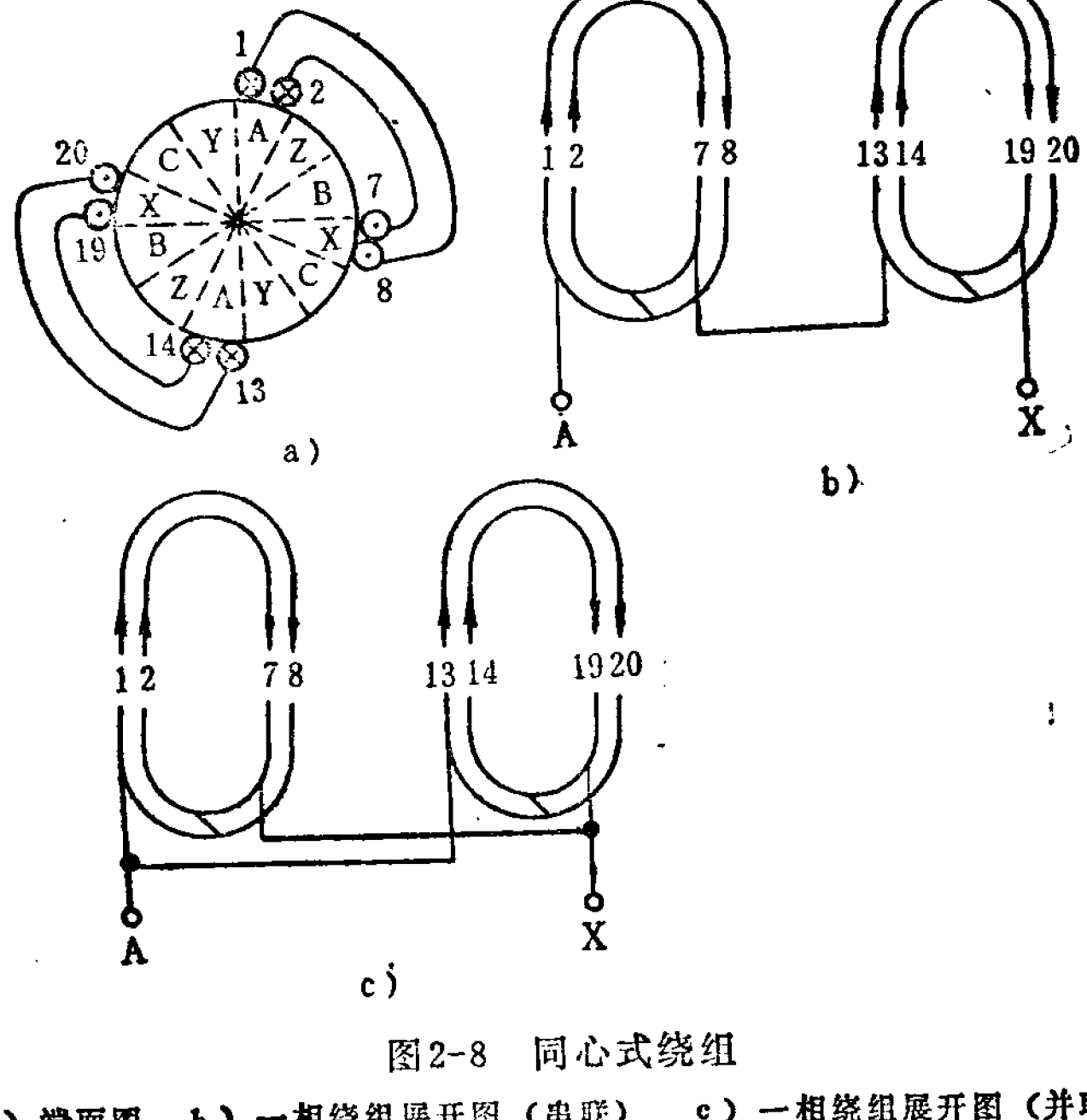


图2-8　同心式绕组

a）端面图　b）一相绕组展开图（串联）　c）一相绕组展开图（并联）

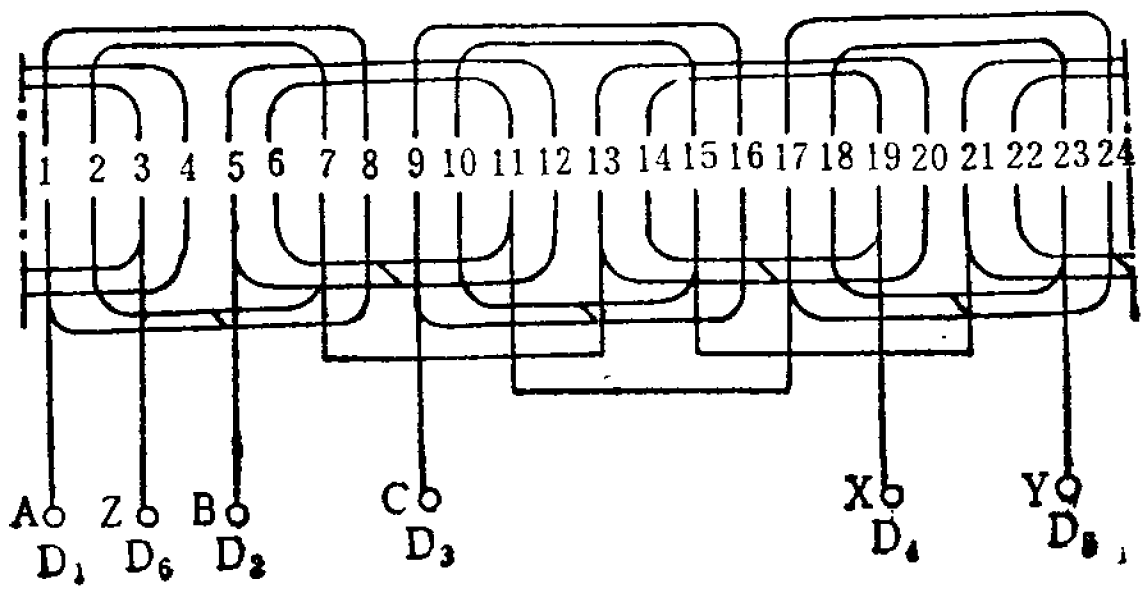


图2-9　同心式绕组展开图

3．链式绕组

在保持三相绕组各导体中电流分布不变的情况下，将图2-4b中属于A相的导体2—7、8—13、14—19和20—1连成4个线圈，其端面图如图2-10 a所示。把各线圈顺着电流方向连接起来，其一相展开图如图2-10 b所示。链式绕组的线圈节距 $y = 5$（槽），它的端部较短。

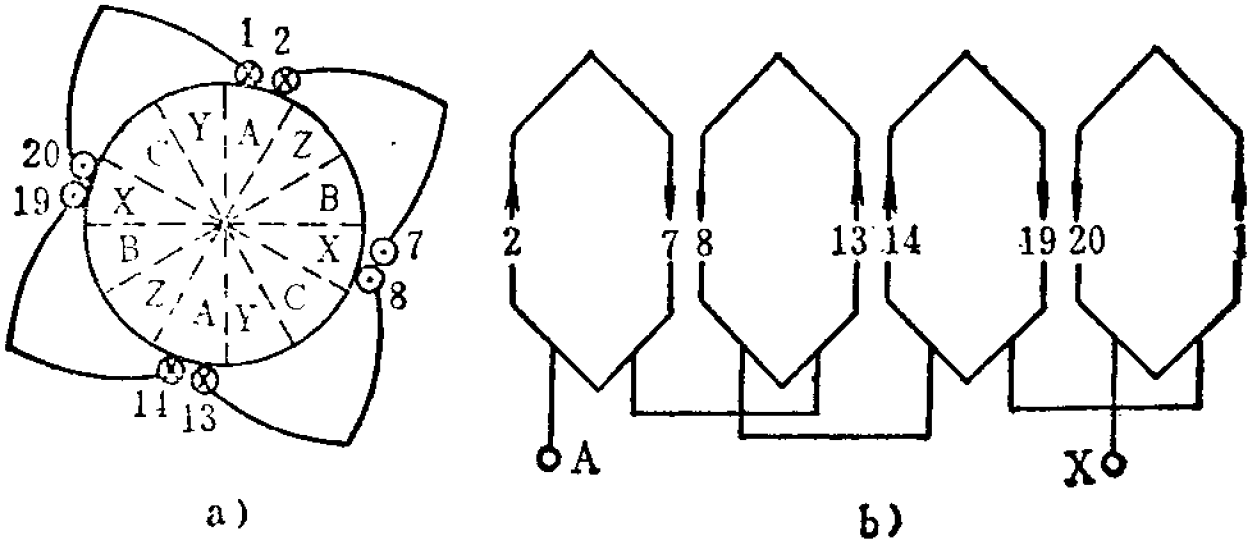


图2-10　链式绕组

a）端面图　b）一相绕组展开图

单层链式绕组在四极时，每一相有4个线圈（即每相的线圈数与电机的磁极数相等），这4个线圈可以串联，也可以并联，或相邻两个线圈串联起来，然后再进行并联，只要不改变导体电流在铁心圆周上的分布情况，则所产生的磁场情况也不会改变。

按照同样的方法，我们把属于B相及C相的各导体分别连接成B相及C相绕组。其三相链式绕组的展开图如图2-11所示。

比较上述三种绕组，由于电流的分布情况相同，因而产生的磁场也相同。但是链式绕组的端接部分最短，可以节省导线，所以目前链式绕组使用较广泛。

4．交叉链式绕组

图2-4 c中表示出了四极36槽绕组中的电流分布，由图可见，

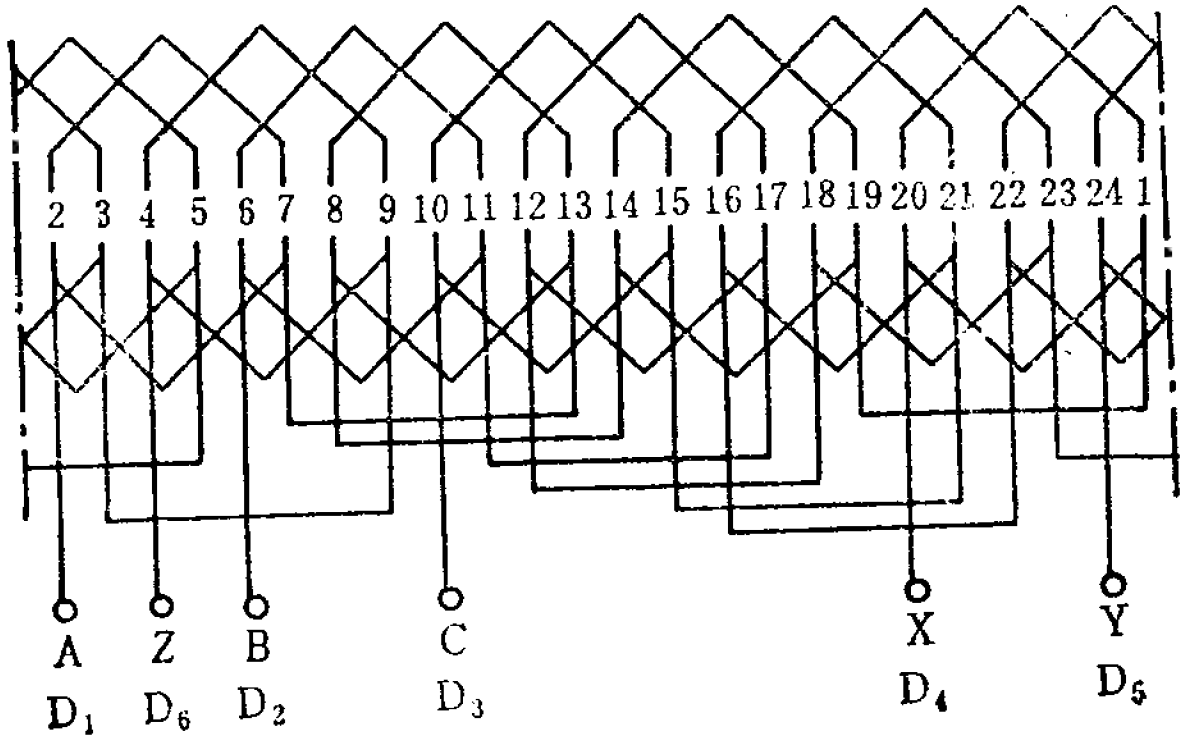


图2-11　链式绕组展开图

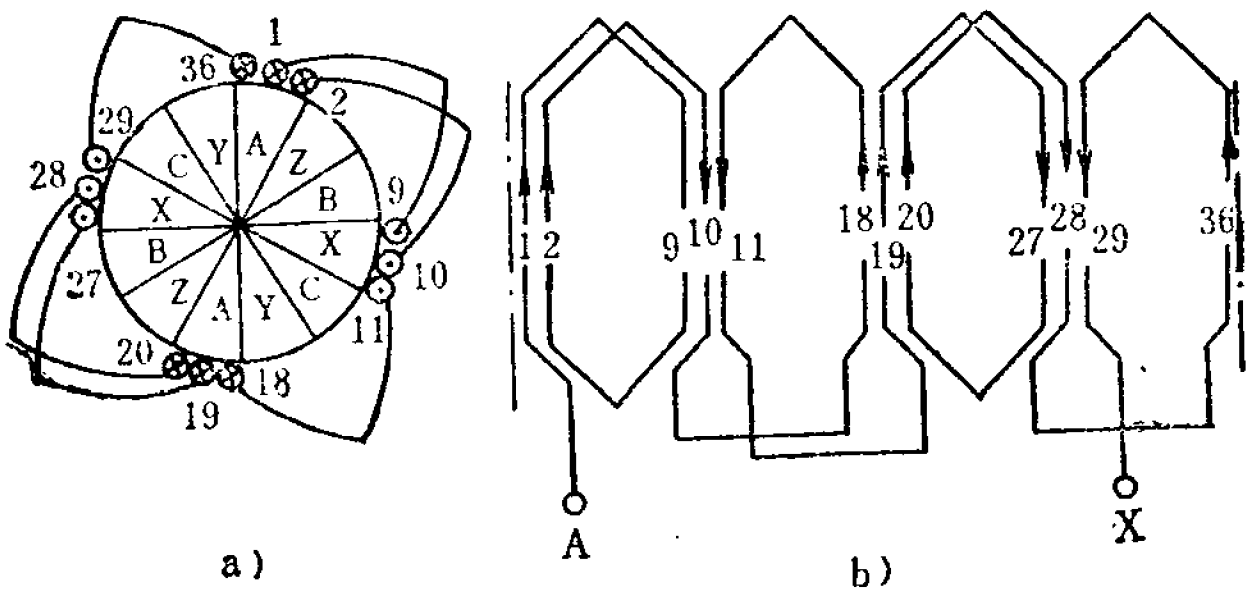


图2-12　交叉链式绕组

a）端面图　b）一相绕组展开图

A相占有36、1、2、9、10、11、18、19、20及27、28、29等12槽，在保持A相导体电流分布不变的情况下，我们按图2-12 a 连接次序进行连接。这时，在每对极下有两个节距为8槽的大线圈和一个节距为7槽的小线圈。顺着电流方向把各线圈串联起来，便得A相绕组的展开图如图2-12 b 所示。这种连接的绕组称为交

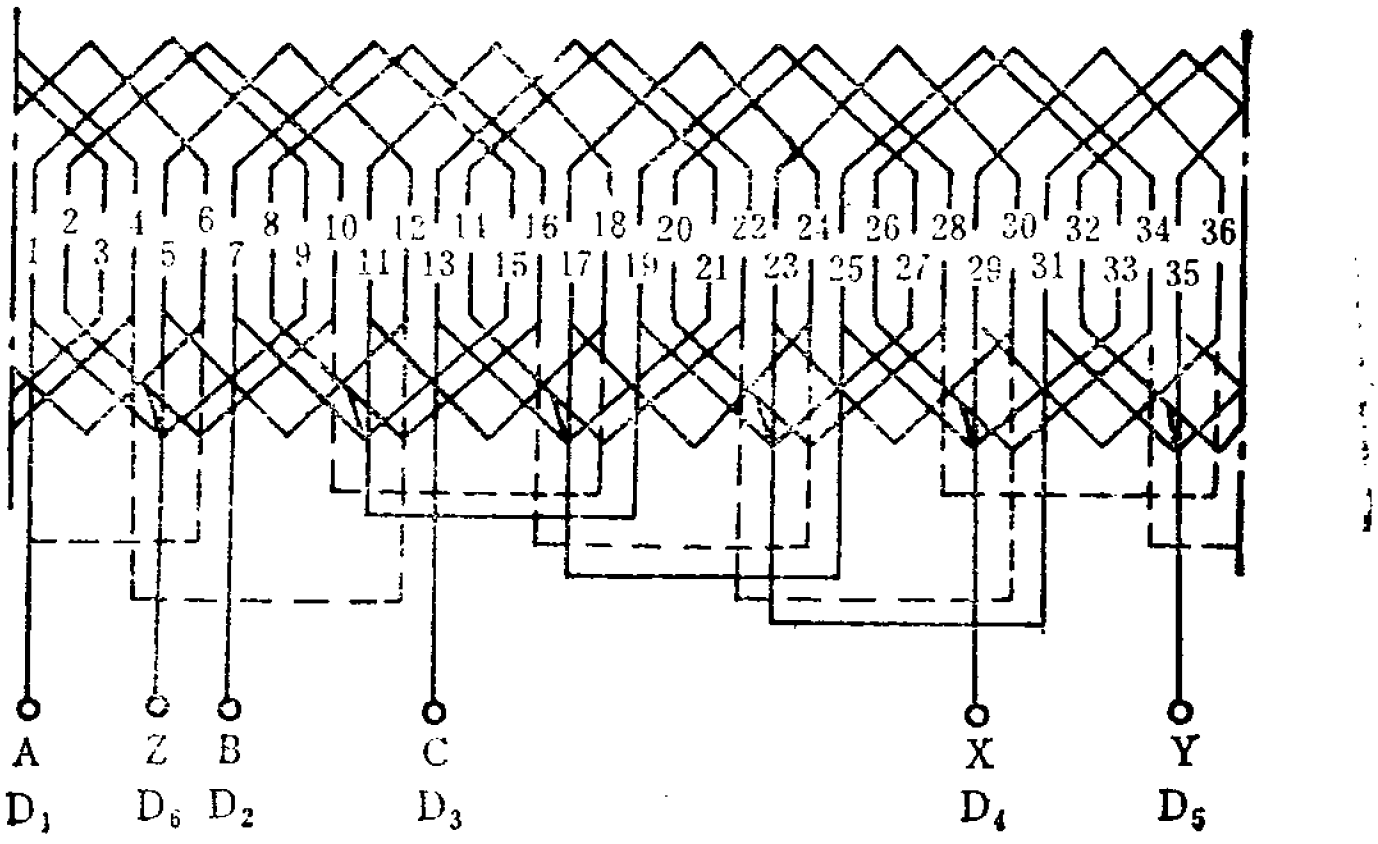


图2-13　交叉链式绕组展开图

叉链式绕组。

图2-13为三相交叉链式绕组展开图。由于每相绕组的电流分布情况未变，所以产生的磁场与整距绕组相同，但交叉链式绕组端部较短，可以节省导线。

5．交叉同心式绕组

图 2-4 a 表示了两极 24槽三相绕组的导体分布。每相绕组在每极下占有$\frac{24}{3\times 2}=4$槽。A 相绕组的端面图及展开图如图2-14所示。由图可见，每相绕组有两个线圈组，每个线圈组内大线圈的节距 $y=11$槽，小线圈的节距 $y=9$ 槽，彼此头尾相连，串联成一个线圈组。每相线圈组数等于极数。单路串联时，应顺着电流方向把两个线圈组尾与尾相连，接成所谓交叉同心式绕组。其绕组展开图如图2-15所示。

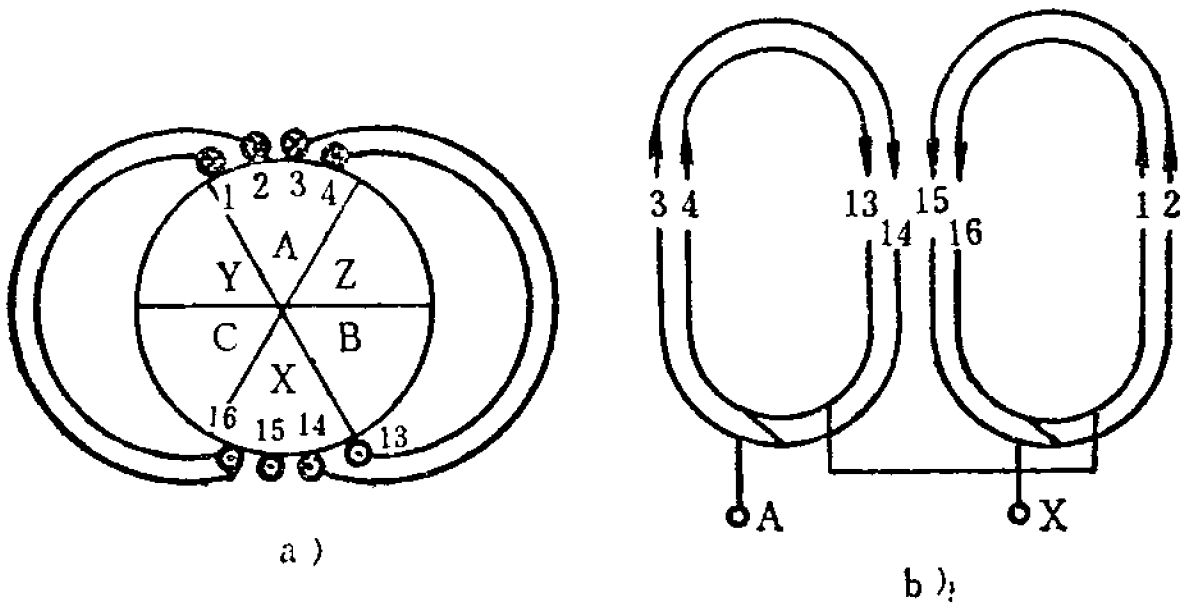


图2-14　交叉同心式绕组

a）端面图　b）一相绕组展开图

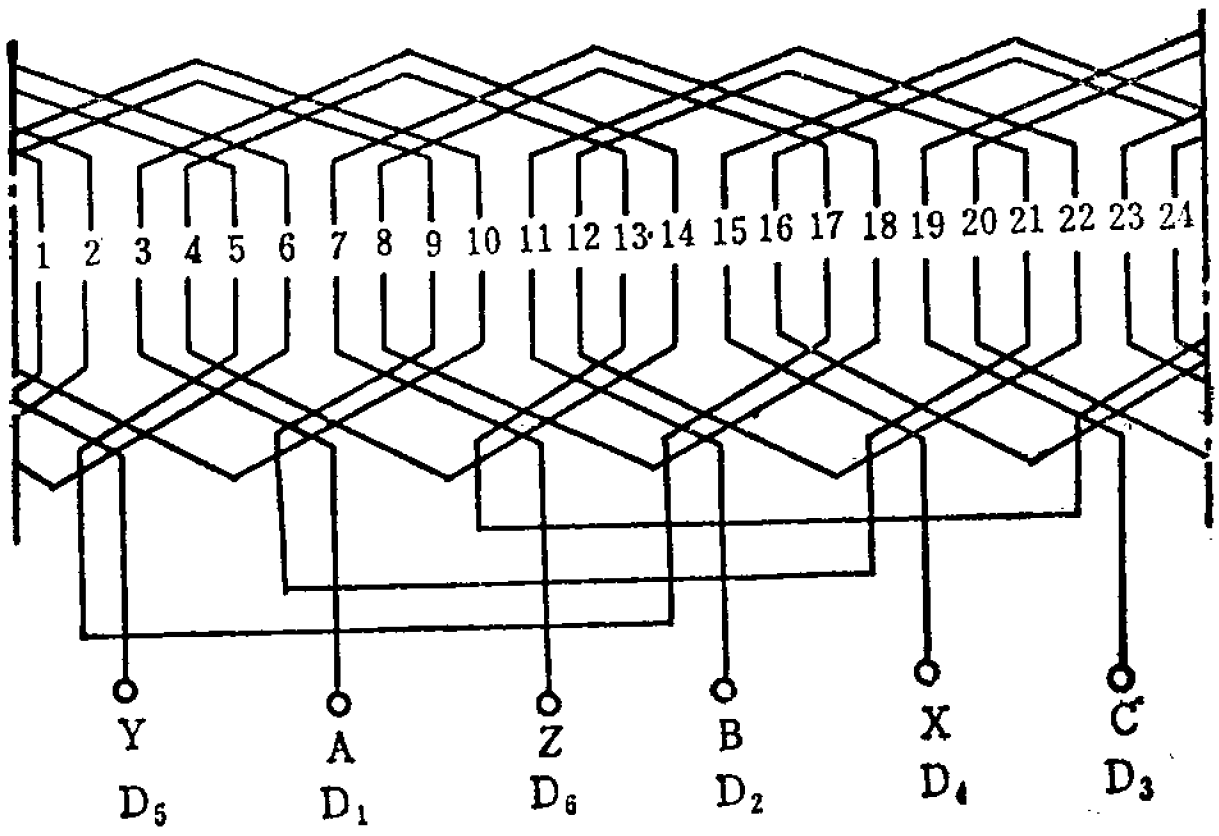


图2-15　交叉同心式绕组展开图

（四）三相双层迭绕组

双层绕组是在铁心的每一槽中放置两个有效边，一个安放在上层，另一个置于下层。一个槽内的上层导体与其相距一定距离（通常称节距）的另一个槽内的下层导体连成一个线圈。各线圈

的形状相同，绕组的线圈数等于槽数。双层绕组的节距可以根据需要在一定范围内任意选择。如果线圈的节距 y 等于极距 τ，则为整距绕组。如果选取适当的短距$\left(\text{通常 } y \approx \frac{5}{6}\tau\right)$，这样可以使感应电动机旋转磁场波形更接近正弦分布，从而改善电机性能。所以，双层绕组通常都是选用短距。由于节距较短，还可以节省导线。

1. 双层整距绕组

双层绕组可以看成是由单层绕组演变而来的。例如，在各相绕组相带分布规律和电流分布不变的情况下，我们把图2-10单层链式绕组中每相邻的两个槽合并为一个槽，分上下两层。所有双号槽的有效边放置在槽的下层，而所有单号槽的有效边安排在上层，这样便可以得到一个 $Z_1 = 12$，$2p = 4$ 的三相双层整距迭绕组，如图2-16所示。展开图中，每一槽中画了一根实线和一根虚线，实线表示上层有效边，而虚线表示下层有效边。导体中的电流方向用箭头表示。从图中可以看出，由于相邻的元件都是互相交叠的，所以这种绕组称为迭绕组。

图2-17为24槽四极双层绕组分布情况，各相绕组的相带分布规律和电流分布都与图 2-4 b 相同，所不同的是图 2-4 b 是单层绕组，每槽只有一个有效边，而图 2-17 是双层绕组，每槽中有上下两层导体。为了区别起见，下层导体编号带“′”。从图中可以看出，A 相绕组仍由槽 1、2、7、8、13、14、19、20 中的导体组成。将导体 1 与7′、2 与8′……连成线圈便构成了双层整距（$y = \tau = 6$）A 相绕组。其绕组展开图如图2-18所示。

2. 双层短距绕组

如果我们将24槽四极双层绕组的线圈节距缩短一个槽，即选取 $y = 5$，这样将导体1—6′、2—7′……分别连成线圈1、2……。每

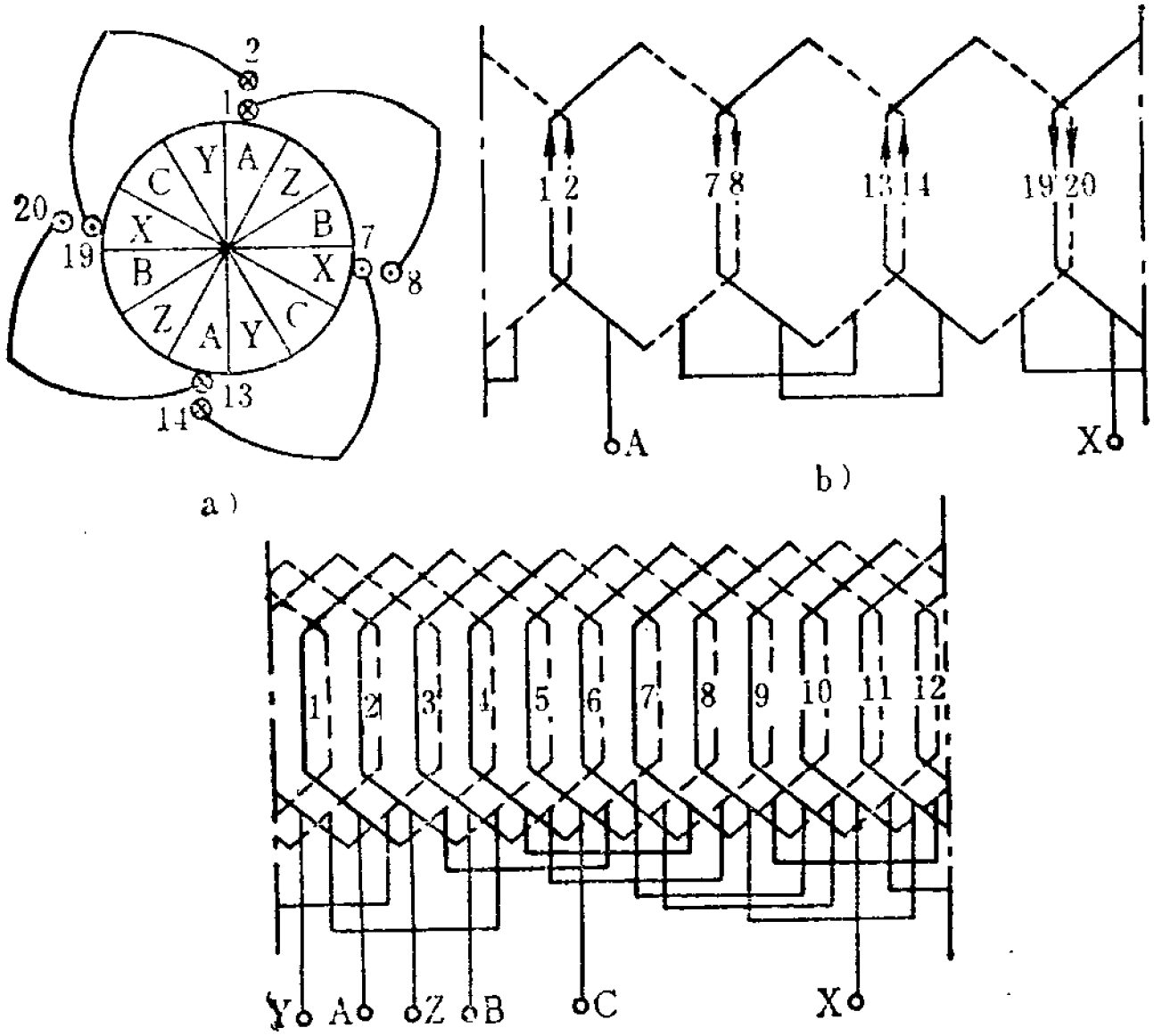


图2-16　单层链式绕组演变为双层整距绕组

a）端面图　b）一相绕组展开图　c）三相绕组展开图

个线圈的下层导体都提前一个槽。图2-17中每相绕组上层导体的位置保持不变，而将下层导体的位置全部逆时针方向转过一槽，就可得到双层短距绕组的端面图及电流分布如图2-19 a 所示。图中，电流方向仍是 i_a 为正，i_b、i_c 为负 的情况。从图中可以看出，每一个极距内，有一个槽的上、下层导体电流方向相反，而且不是属于同一相，这是由于我们选用了短距绕组的缘故。一般说来，线圈节距缩短几个槽，就有

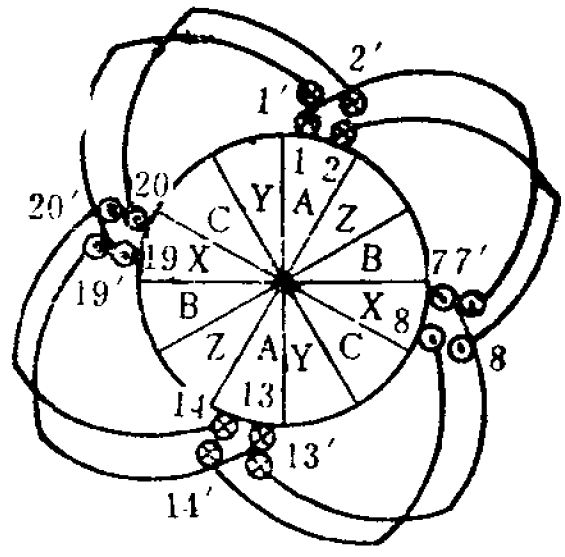


图2-17　双层整距绕组端面图

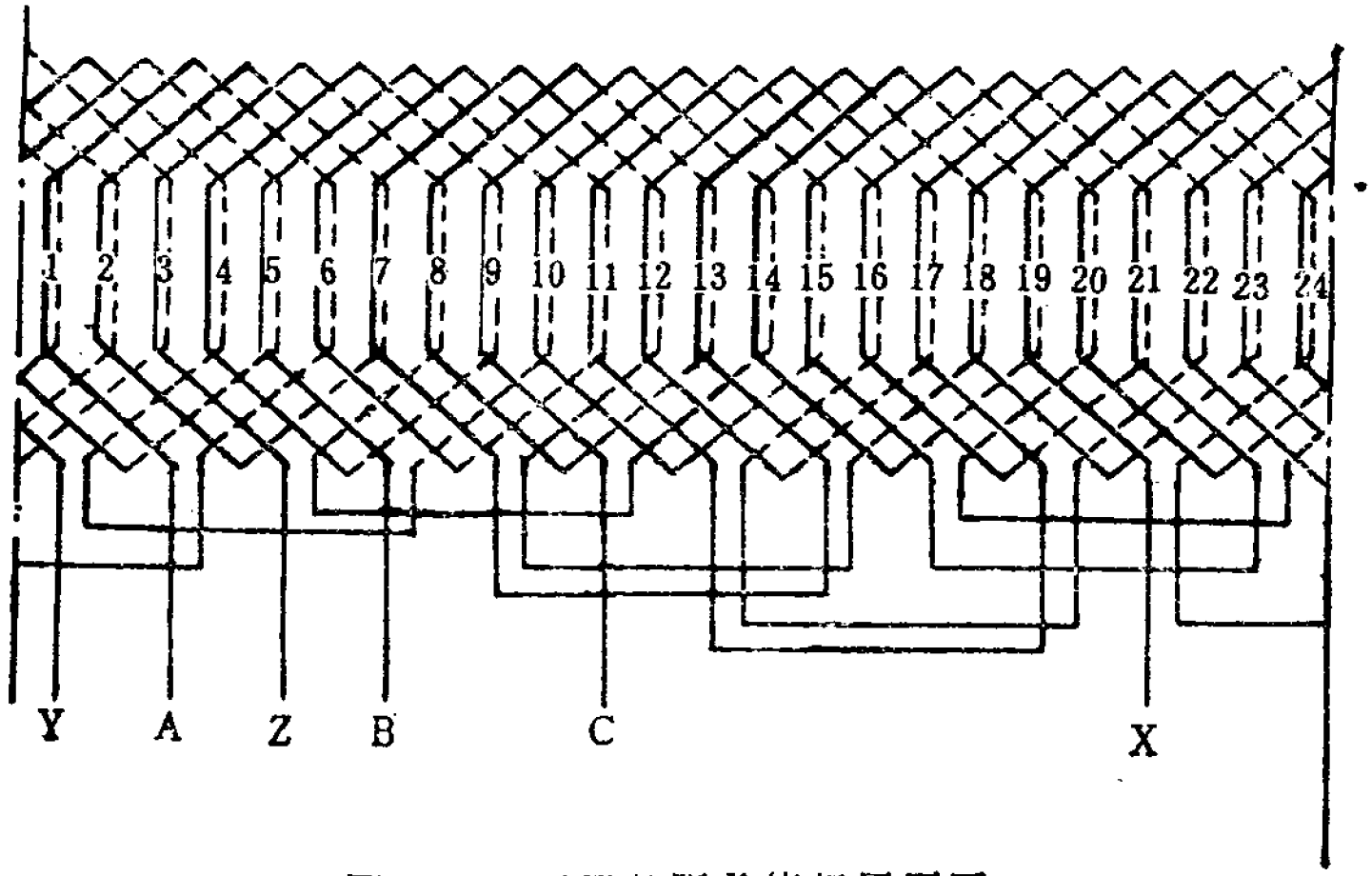


图2-18　双层整距叠绕组展开图

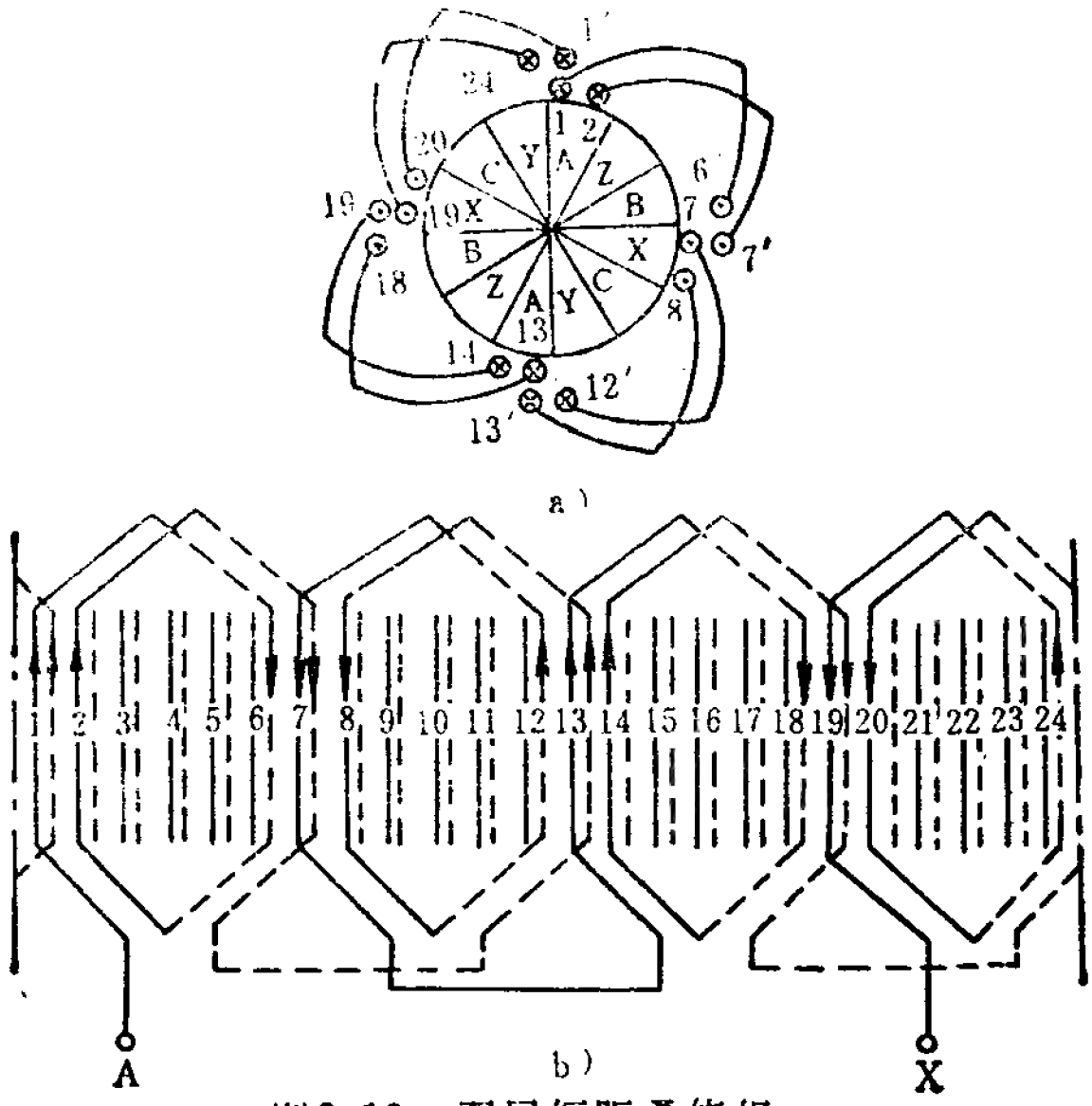


图2-19　双层短距叠绕组

a）端面图　b）一相绕组展开图

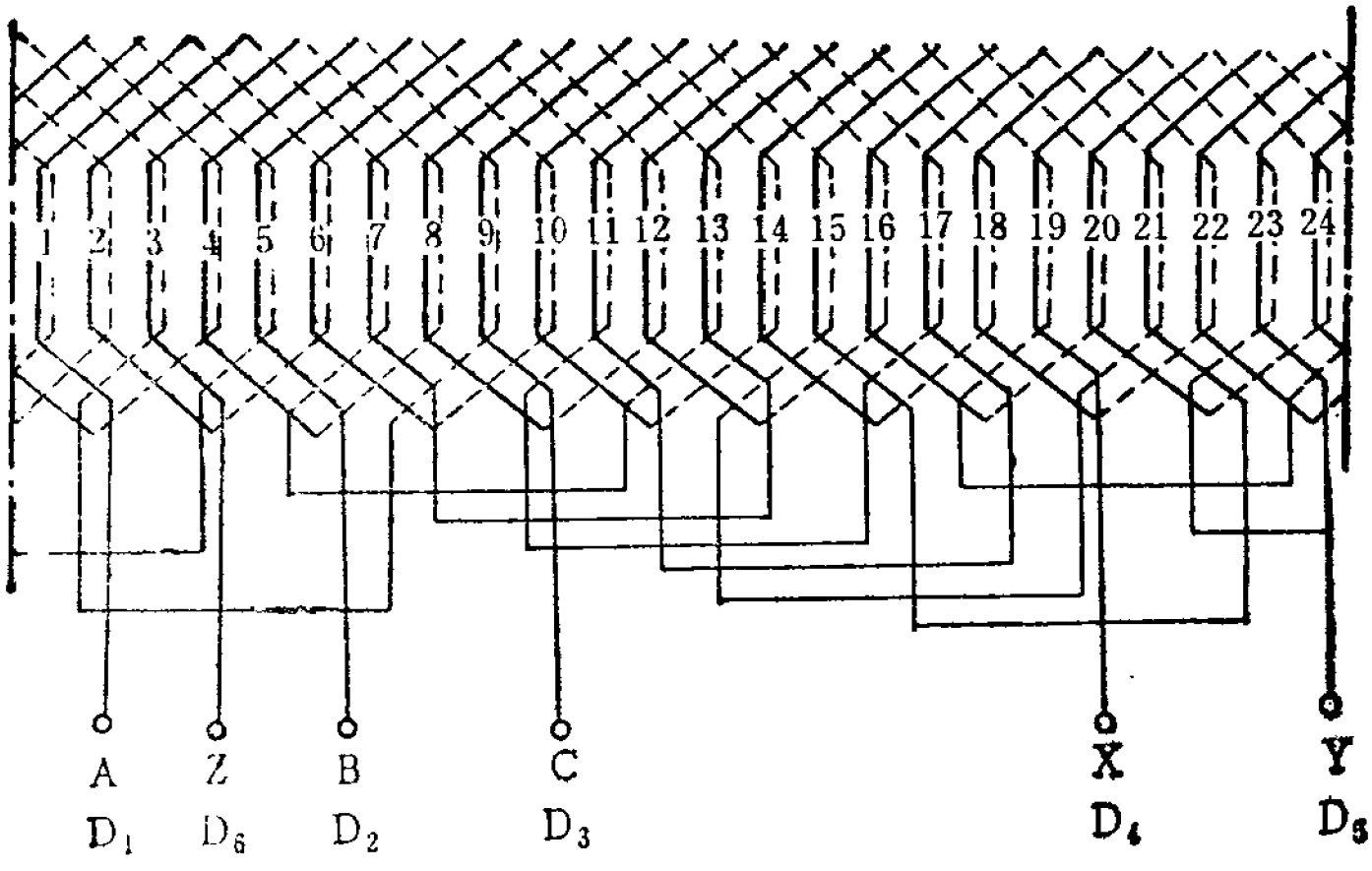


图2-20　双层短距叠绕组展开图

几个槽的电流方向相反。但是，总的电流分布仍然产生一个四极磁场。这种现象对产生的磁场有所削弱，但其波形将得到改善。图2-19 b 为一相绕组展开图。

图2-20为三相双层短距叠绕组展开图。从图中可以看出，四极双层叠绕组每相有 4 个线圈组。显然，每相线圈组数等于极数（$2p$），所以，各相单路串联方法，采用头头相接、尾尾相接的反串联。

双层绕组主要用于 10kW 以上的电机中。电机容量越大，额定电流也越大，导线的截面也相应增大，这就给工艺上带来了困难。因此，双层绕组常采用多路并联，其最大可能并联支路数 a 等于每相的线圈组数，也就是等于磁极数，即 $a = 2p$。

三相绕组的排列将使电机磁势波形中出现较强的高次谐波。而高次谐波将严重地影响到电机的运行性能。现以每对极下有12槽为例，画出三相绕组的排列及槽电流沿圆周的分布。为了便于分析，我们将定子铁心沿轴向剖开展平，如图2-21所示。图中，

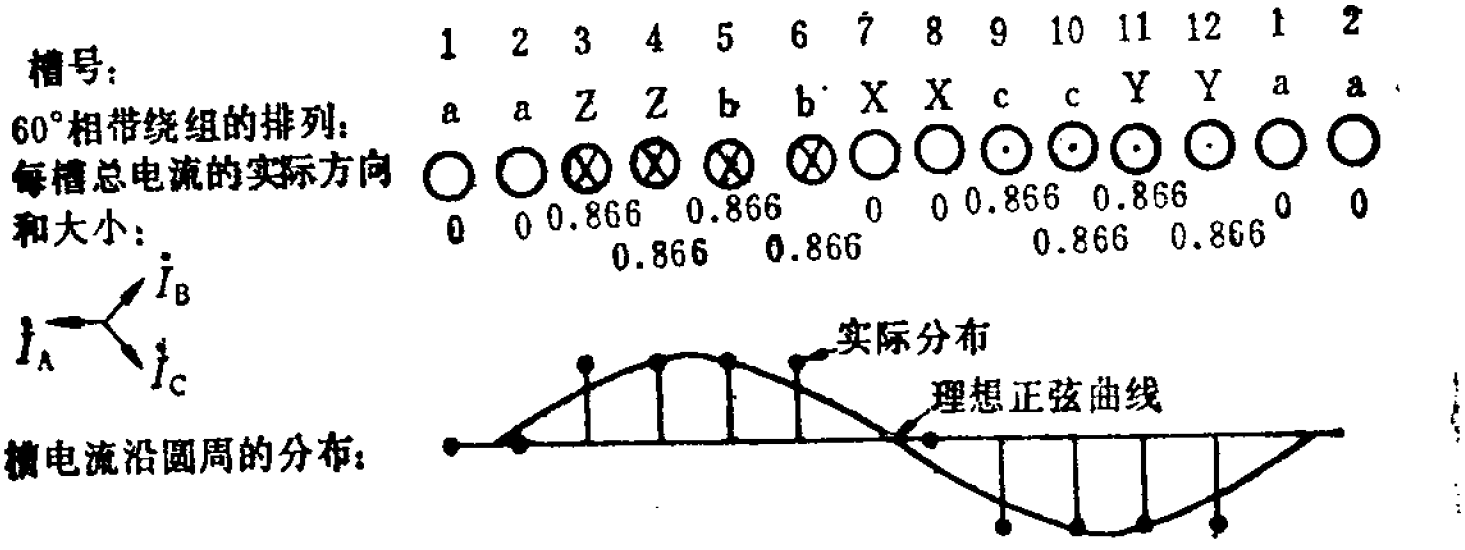


图2-21　每对极12槽的三相单层绕组的排列及槽电流沿圆周的分布

三相对称绕组通入三相对称正弦电流。

从图中可以看出，三相绕组的槽电流沿圆周的分布与理想的正弦曲线有较大的偏离，故其磁势波形中会有较强的高次谐波。

三、正弦绕组

三相绕组磁势中所包含的高次谐波的强弱直接影响着电动机的性能。采用正弦绕组可以加强基波磁势、削弱五次、七次等一系列谐波磁势。由于磁势曲线中一系列高次谐波被消除（或显著地削弱），因而电机的出力可提高（或温升下降），同时振动和噪声减小，从而改善了电机的性能，降低了电能的消耗。这对节能具有重要意义。

（一）正弦绕组的构成

正弦绕组是在普通的三相绕组的基础上发展而来的，因而正弦绕组的构成也是建立在普通的三相绕组的基础之上的。

从图2-4 a 所示的两极 24 槽三相绕组的分布情况可以看出，

A相绕组的相带A区包含导体1、2、3、4，相带X区包含导体13、14、15、16。在保持导体中电流方向不变的情况下，我们将相带A分成相等的两部分，以$A_{\triangle}$及$A_{\perp}$表示（参见图3-1）。这样，相带$A_{\triangle}$区包含导体1、2，相带$A_{\perp}$区包含导体3、4。同样，将相带X亦分成相等的两部分，以$X_{\triangle}$及$X_{\perp}$表示。相带$X_{\triangle}$区包含导体13、14，相带$X_{\perp}$区包含导体15、16。由于相带$A_{\triangle}$中的电流方向与相带$X_{\triangle}$中的相反，所以相带$A_{\triangle}$中的任何一根导体都可以与相带$X_{\triangle}$中的任何一根导体连成一个线圈。同样，相带$A_{\perp}$中的电流方向也与相带$X_{\perp}$中的相反，因此，相带$A_{\perp}$中的任何一根导体也可以与相带$X_{\perp}$中的任何一根导体连成一个线圈。按照同样的规律，我们可以将B相绕组的相带B区分成$B_{\triangle}$及$B_{\perp}$（其中$B_{\triangle}$区包含导体9、10，$B_{\perp}$区包含导体11、12）；将相带Y区分成$Y_{\triangle}$及$Y_{\perp}$（其中$Y_{\triangle}$区包含导体21、22，$Y_{\perp}$区包含导体23、24）；将C相绕组的相带C区分成$C_{\triangle}$及$C_{\perp}$（其中$C_{\triangle}$区包含导体17、18，$C_{\perp}$区包含导体19、20）；将相带Z区分成$Z_{\triangle}$及$Z_{\perp}$（其中$Z_{\triangle}$区包含导体5、6，$Z_{\perp}$区包含导体7、8）。相带$B_{\triangle}$、$B_{\perp}$、$C_{\triangle}$、$C_{\perp}$中的任何一根导体可分别与相带$Y_{\triangle}$、$Y_{\perp}$、$Z_{\triangle}$、$Z_{\perp}$中的任何一根导体连接成一个线圈。这样便将普通的三相绕组改成了正弦绕组，其分布情况如图3-1所示。

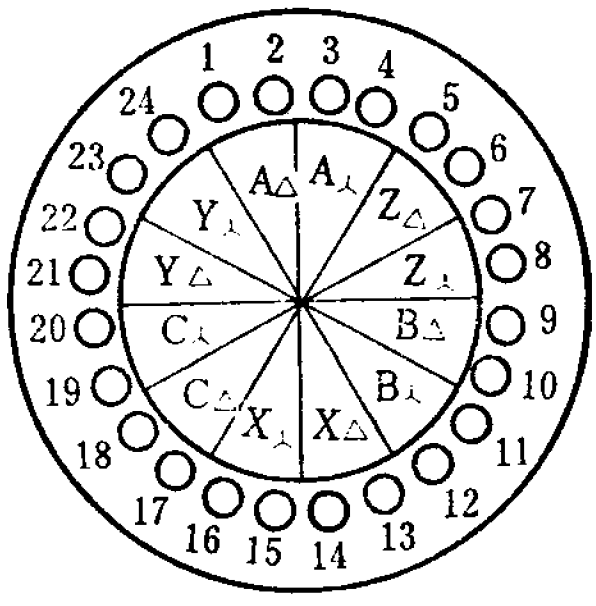


图3-1　两极24槽正弦绕组分布情况

为简单起见，我们以两极12槽为例来分析正弦绕组。图3-2a为三相绕组分布情况。我们将三相绕组的每一相带分为相等的两个部分，其中一部分称为三角形（△）部分，另一部分称为星形（⊥）部分，亦即将每相绕组在每极下占据的槽数q分成相等

的两部分，即

$$q_{\triangle}=q_{\perp}=\frac{q}{2}=\frac{z_1}{2\times 6p}=\frac{12}{2\times 6\times 1}=1$$

式中 $q_{\triangle}$——三角形部分每极每相槽数；

$q_{\perp}$——星形部分每极每相槽数。

这样使得一个磁极下 3 个相带变成了 6 个相带，因而每个相带占 1/6 极距，对应为 30° 电角度，故按 这种规律安排的绕组又称为 30° 相 带绕组，如图 3-2 b 所示。

三角形部分各相绕组在空间相互间隔120° 电角度；星形部分各相绕组在空间亦相互间隔120° 电角度。而三角形部分与星形部分绕组在空间交替放置，为此，每对磁极下每个相带 依 次 注 以 $A_{\triangle}$、$A_{\perp}$、$Z_{\triangle}$、$Z_{\perp}$、$B_{\triangle}$、$B_{\perp}$、$X_{\triangle}$、$X_{\perp}$、$C_{\triangle}$、$C_{\perp}$、$Y_{\triangle}$、$Y_{\perp}$。这样，三角形部分各相绕组线圈的始边 $A_{\triangle}$、$B_{\triangle}$、$C_{\triangle}$ 间都刚好相互间隔 120° 电角度；星形部分各相绕组线圈的始边 $A_{\perp}$、$B_{\perp}$、$C_{\perp}$ 间也都刚好相互间隔120° 电角度。而三角形部分与星形部分线圈组之间彼此互差30° 电角度。

为了说明正弦绕组的排列和相电势之间的相位关系，我们引

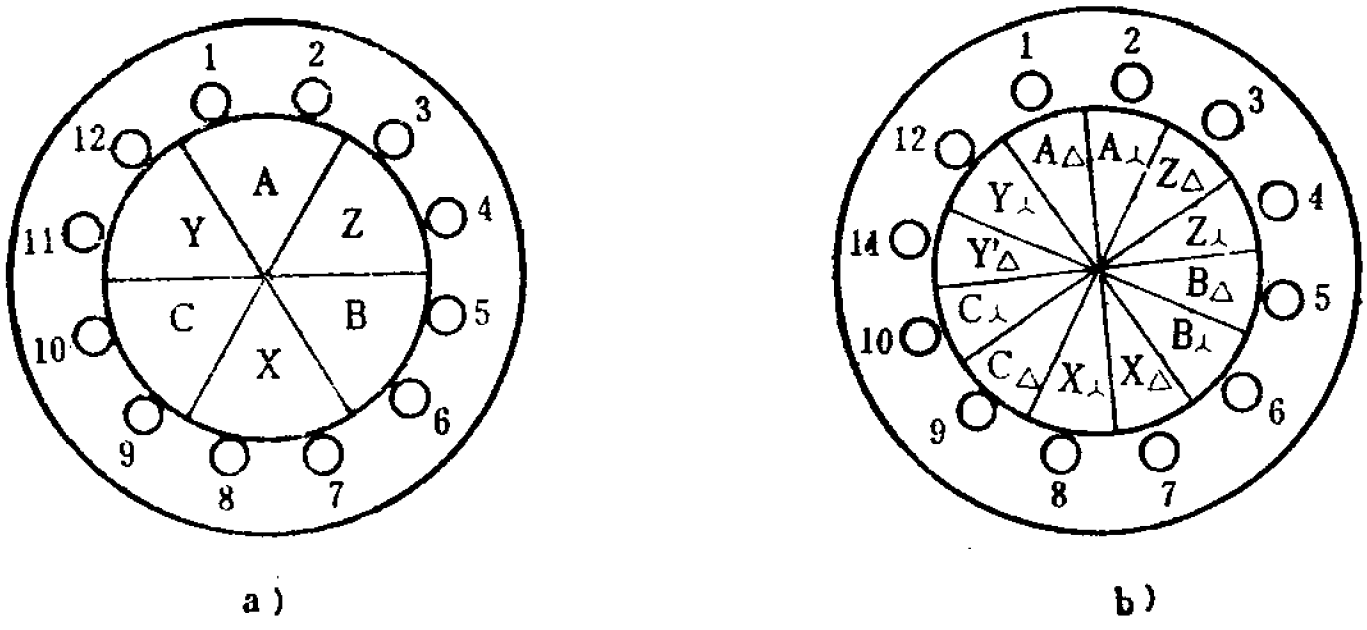


图3-2 两极12槽绕组的分布情况

a）三相绕组 b）正弦绕组

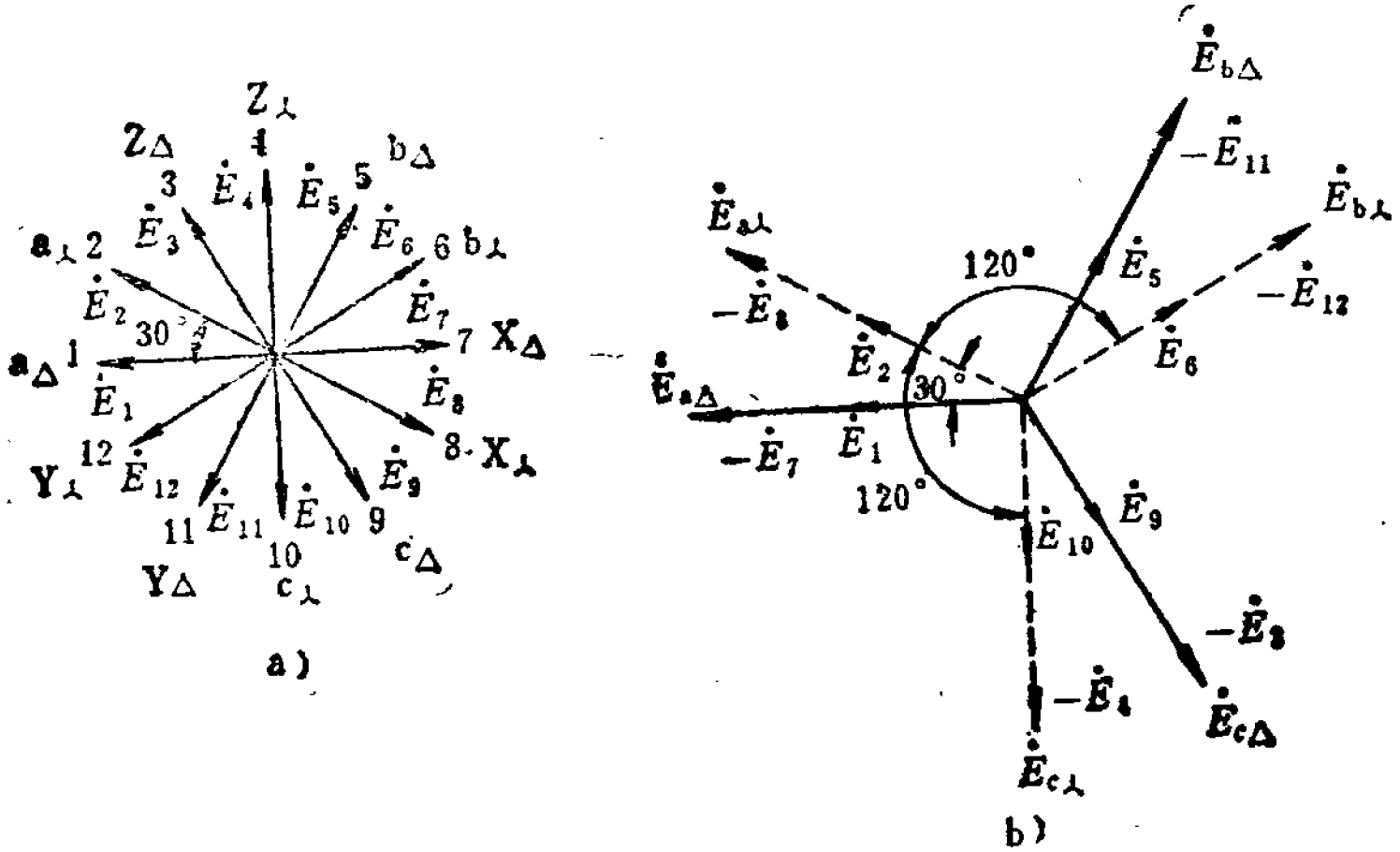


图3-3　正弦绕组排列和电势星形

a）正弦绕组排列和槽电势星形　b）相电势星形

入槽电势星形图和相电势星形图，如图 3-3 所示。图 3-3 a 中，我们以相量表示每槽中导体的感应电势。编号1、2……表示槽号。从图中可以看出，1 号槽属于相带 $A_{\triangle}$，1 号槽中导体感应电势相量 $\dot{E}_1$ 为水平方向且指向左方；而 2 号槽属于相带 $A_{人}$，2 号槽中导体感应电势相量 $\dot{E}_2$ 滞后 $\dot{E}_1$ 30° 电角度。依次类推。$A_{\triangle}$ 与 $X_{\triangle}$ 同属 A 相三角形部分，将导体 1 与 7 连成一个线圈，其线圈电势、即 A 相三角形部分电势 $\dot{E}_{a\triangle}=\dot{E}_1+(-\dot{E}_7)$；同样，$A_{人}$ 与 $X_{人}$ 同属 A 相星形部分，将导体 2 与 8 连成一个线圈，A 相星形部分电势 $\dot{E}_{a人}=\dot{E}_2+(-\dot{E}_8)$。其余类推。相电势星形如图3-3b所示。

由图 3-3 a 可见，三相三角形部分相电势 $\dot{E}_{a\triangle}$、$\dot{E}_{b\triangle}$、$\dot{E}_{c\triangle}$ 大小相等、相位互差120° 电角度，因而，三相三角形部分线圈可以组成一对称的三相绕组。同样，三相星形部分相电势 $\dot{E}_{a人}$、$\dot{E}_{b人}$、$\dot{E}_{c人}$ 亦大小相等、相位互差120° 电角度，因而三相星形部分线圈

也可以组成另一对称的三相绕组。对于定子绕组来说，这两套三相绕组同时存在，而且还按一定的规律连接起来，因此，这种绕组也称为六相绕组。

从图中还可以看出，星形部分相绕组中的感应电势滞后于三角形部分相绕组中的感应电势30°电角度，如：$\dot{E}_{a人}$滞后于$\dot{E}_{a\triangle}$30°电角度；$\dot{E}_{b人}$滞后于$\dot{E}_{b\triangle}$30°电角度；$\dot{E}_{c人}$滞后于$\dot{E}_{c\triangle}$30°电角度。

正弦绕组中的两套绕组有两种连接方式：（1）延边三角形连接，以符号△表示；（2）星形——三角形连接，以符号⚠表示。现分别叙述如下：

（1）延边三角形（△）连接

这种连接方式首先将三角形部分绕组连接成一个三角形，然后将星形部分绕组分别连接到三角形的三个顶点，引出三根线，接至三相电源，如图3-4 a 所示。这种连接方式从图形上看就好象将三角形的三条边延长，因此称为延边三角形。

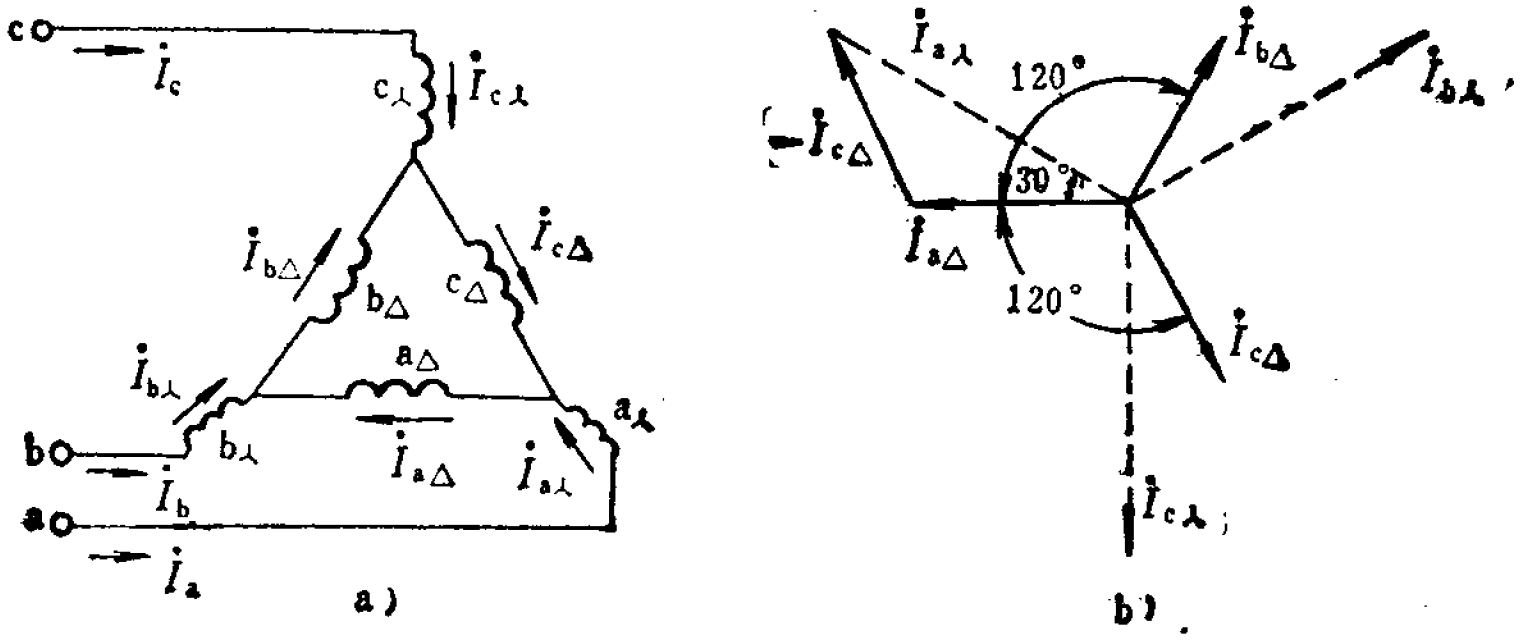


图3-4　延边三角形连接

a）绕组连接图　b）电流相量图

三相对称的三角形部分绕组中流过的电流 $\dot{I}_{a\triangle}$、$\dot{I}_{b\triangle}$、$\dot{I}_{c\triangle}$ 大小相等、相位互差120°电角度；而三相对称的星形部分的绕组中流过的电流即为三相线路电流 $\dot{I}_a=\dot{I}_{a人}$、$\dot{I}_b=\dot{I}_{b人}$、$\dot{I}_c=\dot{I}_{c人}$。

由绕组连接图可知

$$\dot{I}_a=\dot{I}_{a人}=\dot{I}_{a\triangle}+(-\dot{I}_{c\triangle})$$
$$\dot{I}_b=\dot{I}_{b人}=\dot{I}_{b\triangle}+(-\dot{I}_{a\triangle})$$
$$\dot{I}_c=\dot{I}_{c人}=\dot{I}_{c\triangle}+(-\dot{I}_{b\triangle})$$

其电流相量图如图3-4 b 所示。由图可知，每相星形部分通过的电流相位滞后于三角形部分对应相的相电流30°时间电角度，大小则等于三角形部分相电流的$\sqrt{3}$倍。

（2）星形-三角形（△）连接

这种连接方式首先分别将三角形部分绕组连接成一个三角形，星形部分绕组连接成一个星形，然后将星形绕组三根引出线分别与三角形绕组三个顶点连接起来，并接至三相电源，如图3-5 a 所示。这种连接方式从图形上看就好象星形与三角形画在一起，故称为星形-三角形连接。

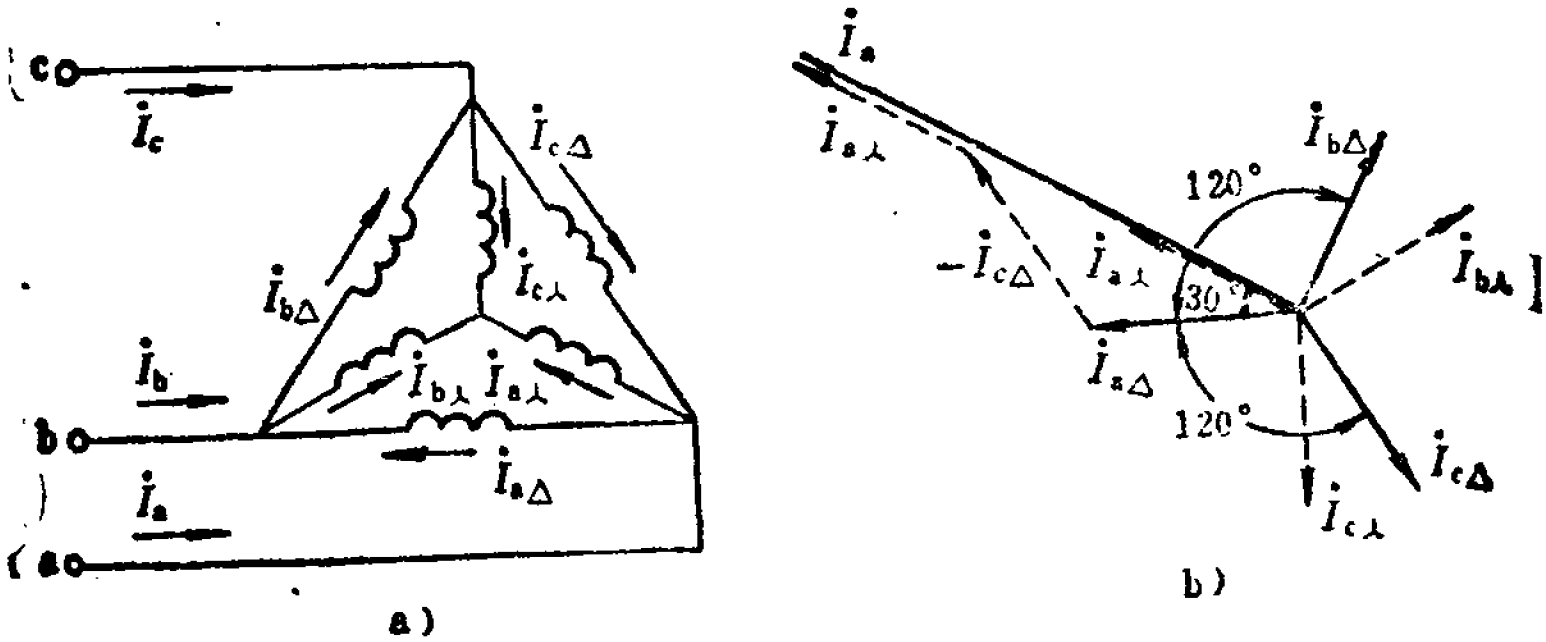


图3-5　星形-三角形连接

a）绕组连接图　b）电流相量图

在星形-三角形连接的绕组中，每相星形部分通过的电流亦滞后于三角形部分对应相的相电流 30°时间电角度，而线路电流为

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{a\triangle} + (-\dot{I}_{c\triangle}) + \dot{I}_{a\curlywedge}$$

$$\dot{I}_b = \dot{I}_{b\triangle} + (-\dot{I}_{a\triangle}) + \dot{I}_{b\curlywedge}$$

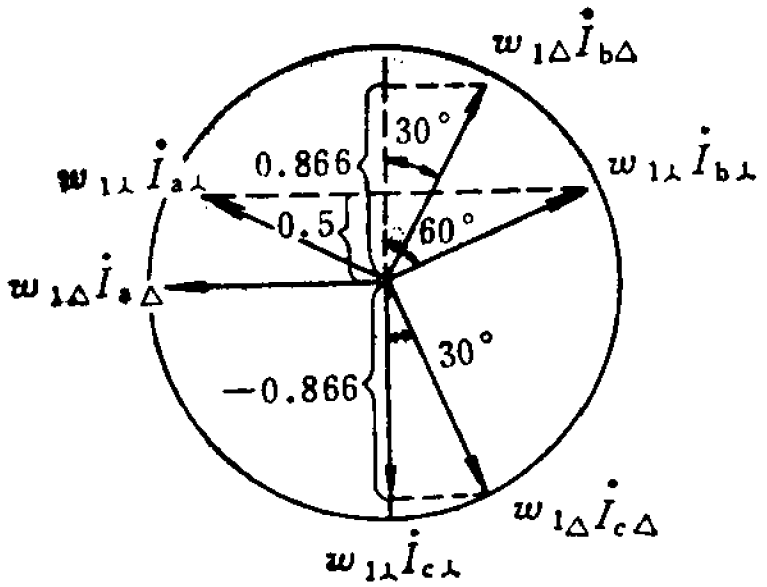
$$\dot{I}_c = \dot{I}_{c\triangle} + (-\dot{I}_{b\triangle}) + \dot{I}_{c\curlywedge}$$

其相位与星形部分相电流同相位，而大小为星形部分相电流的 $(1+\sqrt{3})$ 倍。电流相量图如图 3-5 b 所示。

正弦绕组就是利用星形部分的每相绕组在定子槽内排列时滞后于三角形部分相应相绕组30°空间电角度，使两部分相绕组中的感应电势差 30°电角度的相位差。同时，绕组的连接（接成△或△），又保证了星形部分相绕组中的电流滞后于三角形部分相应相绕组中的电流 30°时间电角度，从而显著改善了定子绕组旋转磁势波形，即消除或削弱了磁势曲线中的五次、七次等一系列高次谐波。

我们以延边三角形接法的正弦绕组为例来进行说明：从图 3-4△接法的电流相量图中可以看出，星形部分相电流的有效值为三角形部分相电流的有效值的$\sqrt{3}$ 倍，如 $I_{a\curlywedge} = \sqrt{3} I_{a\triangle}$。为了使定子每槽电流总的安匝数的有效值相同，应使三角形部分的每个线圈的匝数为星形部分的每个线圈的匝数的$\sqrt{3}$ 倍，即 $w_{1\triangle} = \sqrt{3}\, w_{1\curlywedge}$。这时可以把图 3-4b 所示的电流相量图换成用安匝数表示，其 6 个电流相量都有相同的幅值。图 3-6 就是每对极12槽、单层正弦绕组的排列及其每槽总电流沿圆周的分布。

图 3-6 正弦绕组的槽电流沿圆周的分布说明，槽电流沿圆周的分布曲线已与理想的正弦曲线相吻合。把它与三相绕组的槽电流沿圆周的分布相比，就可看出正弦绕组可以把磁势曲线中一系列高次谐波消除或显著地削弱。



把每槽匝数考虑进去后，相电流，线电流相量已有相同的幅值，即$w_{1\Delta}I_{a\Delta}=w_{1\perp}I_{a\perp}$。在所考虑的这个瞬时，各相量在纵轴上的投影（即各槽电流的实际安匝数）的比例为：

$w_{1\perp}I_{c\perp}$	为 −1
$w_{1\Delta}I_{c\Delta}$	为 −0.866
$w_{1\perp}I_{b\perp}$	为 +0.5
$w_{1\Delta}I_{b\Delta}$	为 +0.866
$w_{1\perp}I_{a\perp}$	为 +0.5
$w_{1\Delta}I_{a\Delta}$	为 0

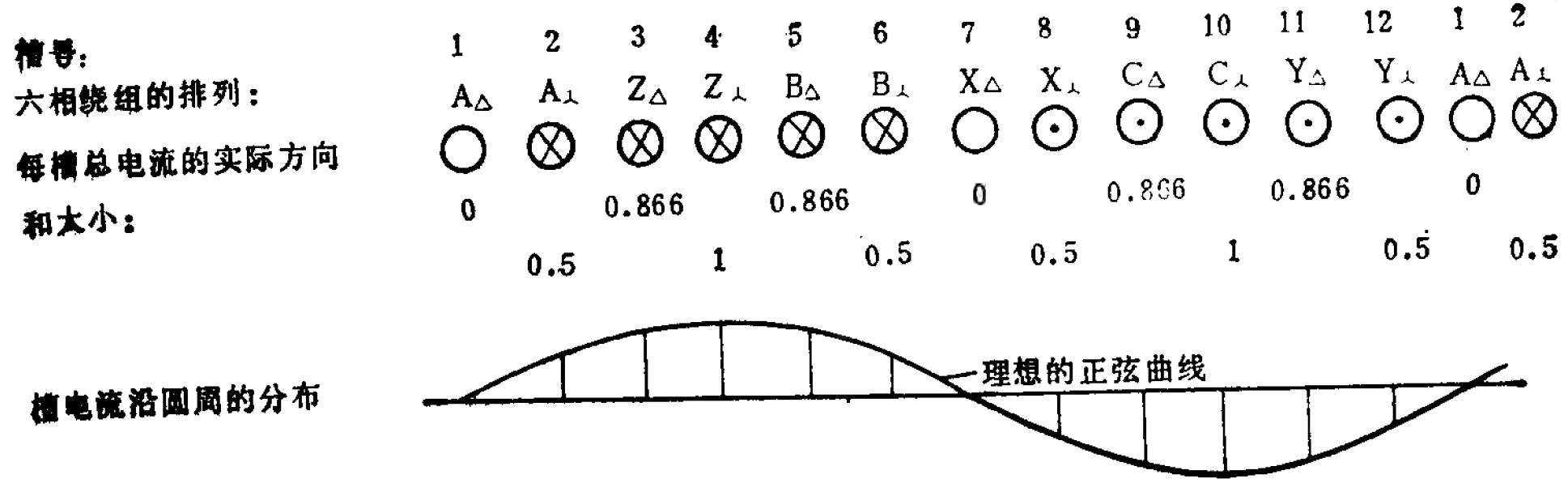


图3-6　正弦绕组的排列及其每槽总电流沿圆周的分布

（二）正弦绕组的排列和连接

1．每极每相槽数 q 为偶数时正弦绕组的排列和连接方法

我们以定子槽数 $Z_1=24$ 、极数 $2p=4$ 为例来说明正弦绕组的排列和连接。

（1）由定子槽数 $Z_1=24$，极数 $2p=4$，算出每槽电角度

$$\alpha=\frac{2p\times180^\circ}{Z_1}$$

$$=\frac{4\times180^\circ}{24}=30^\circ$$

作出电势星形图如图3-7所示。

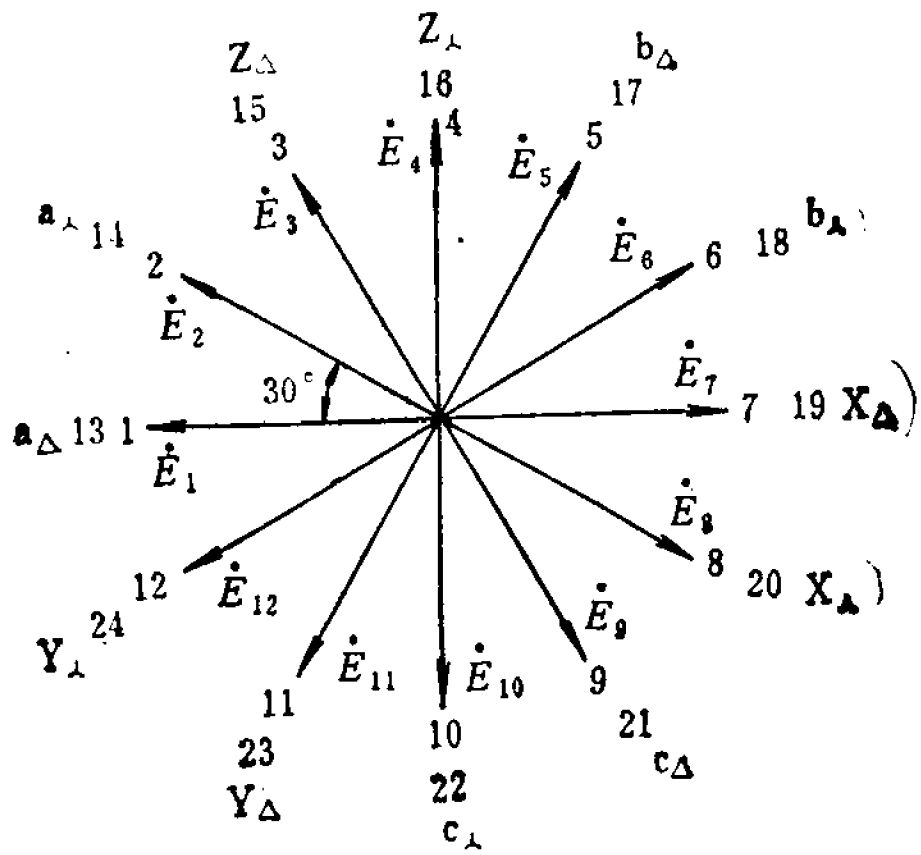


图3-7　$Z_1=24$，$2p=4$，槽电势星形及正弦绕组的排列

（2）利用槽电势星形图确定绕组的排列

三相绕组按每极每相槽数 $q=\frac{Z_1}{m_1\times2p}=\frac{Z_1}{6p}=\frac{24}{6\times2}=2$ 进行排列的。而正弦绕组分别按三角形部分和星形部分的每极每相槽数 $q_\triangle=q_人=\frac{q}{2}=\frac{2}{2}=1$ 来进行排列。例如，1号槽属于A相三角形部分，以 $a_\triangle$ 表示；2号槽则属于A相星形部分，以 $a_人$ 表示；其余类推。其顺序为 $a_\triangle$、$a_人$、$Z_\triangle$、$Z_人$、$b_\triangle$、$b_人$、$X_\triangle$、$X_人$、$c_\triangle$、$c_人$、$Y_\triangle$、$Y_人$，如图3-7所示。

（3）由槽电势星形图和绕组排列，画出相电势星形图

将属于同一相的槽电势相量相加，则得到该相的相电势相量，如图3-8所示。

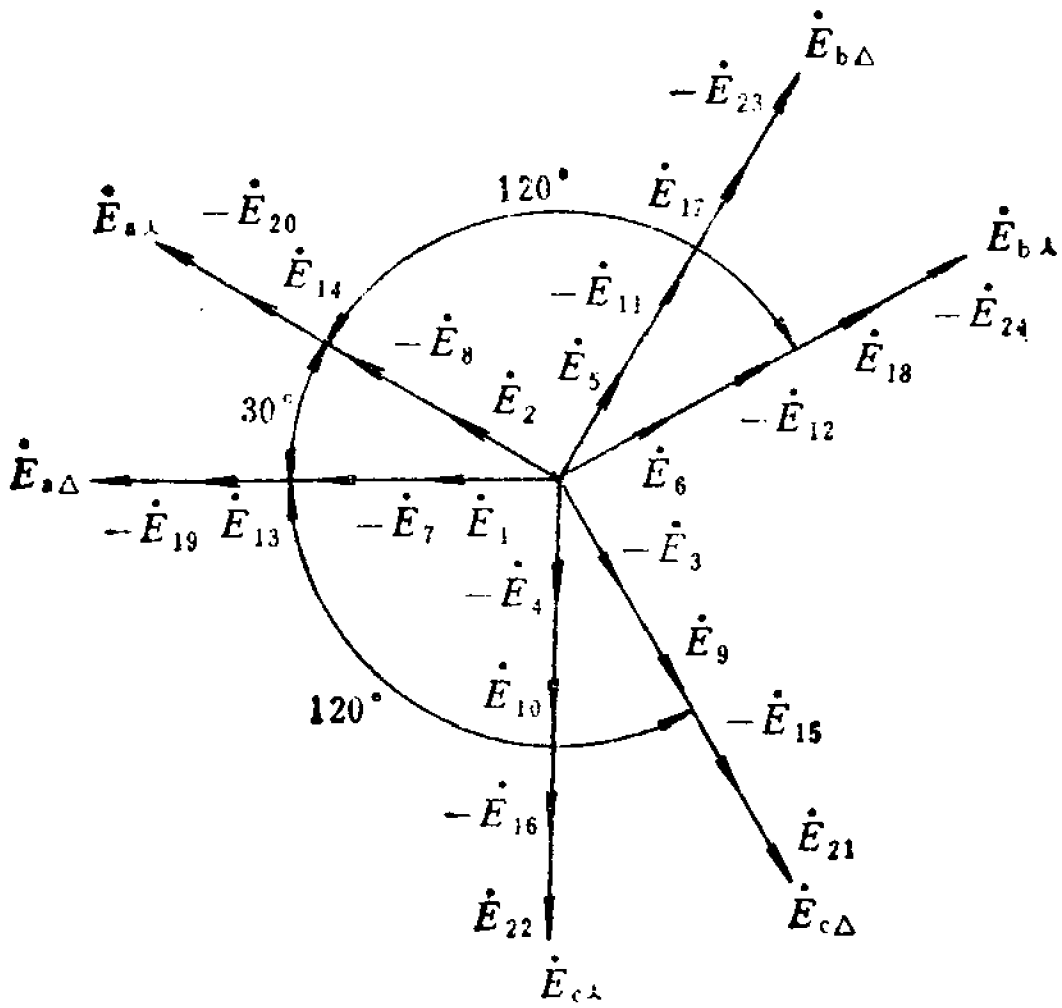


图3-8　$Z_1 = 24$，$2P = 4$ 正弦绕组的相电势星形图

从图中可以看出，三角形部分的三个相电势 $\dot{E}_{a\triangle}$、$\dot{E}_{b\triangle}$、$\dot{E}_{c\triangle}$ 之间彼此互差120°电角度；星形部分的三个相电势 $\dot{E}_{a\curlywedge}$、$\dot{E}_{b\curlywedge}$、$\dot{E}_{c\curlywedge}$ 之间彼此亦互差 120°电角度。而且，星形部分绕组的相电势滞后于三角形部分相应相的相电势 30°电角度。如 $\dot{E}_{a\curlywedge}$ 滞后于 $\dot{E}_{a\triangle}$ 30°电角度，$\dot{E}_{b\curlywedge}$ 滞后于 $\dot{E}_{b\triangle}$30°电角度，$\dot{E}_{c\curlywedge}$ 滞后于 $\dot{E}_{c\triangle}$ 30°电角度。

（4）根据相电势星形图可以画出正弦绕组的平面展开图和接线图

图 3-9 a 为 A 相三角形部分绕组展开图，3-9b 为正弦绕组平面展开图。

由于画绕组的平面展开图比较麻烦，实际上有时画出绕组的简图来表示相绕组的接线方法，如图3-10所示。三角形部分 A 相绕组的首端为 $D_{1\triangle}$，末端为 $D_{4\triangle}$；B 相绕组的首端为 $D_{2\triangle}$，末端为

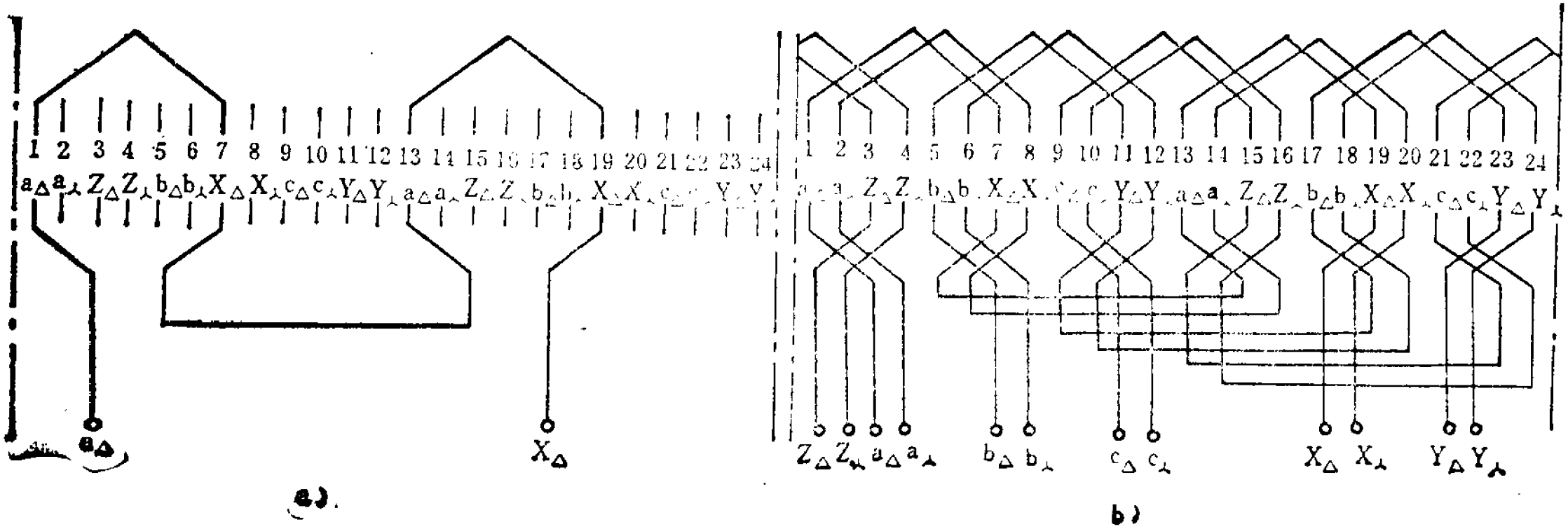


图3-9　$Z_1 = 24$、$2p = 4$ 单层正弦绕组平面展开图

a）A相三角形部分绕组　b）正弦绕组平面展开图

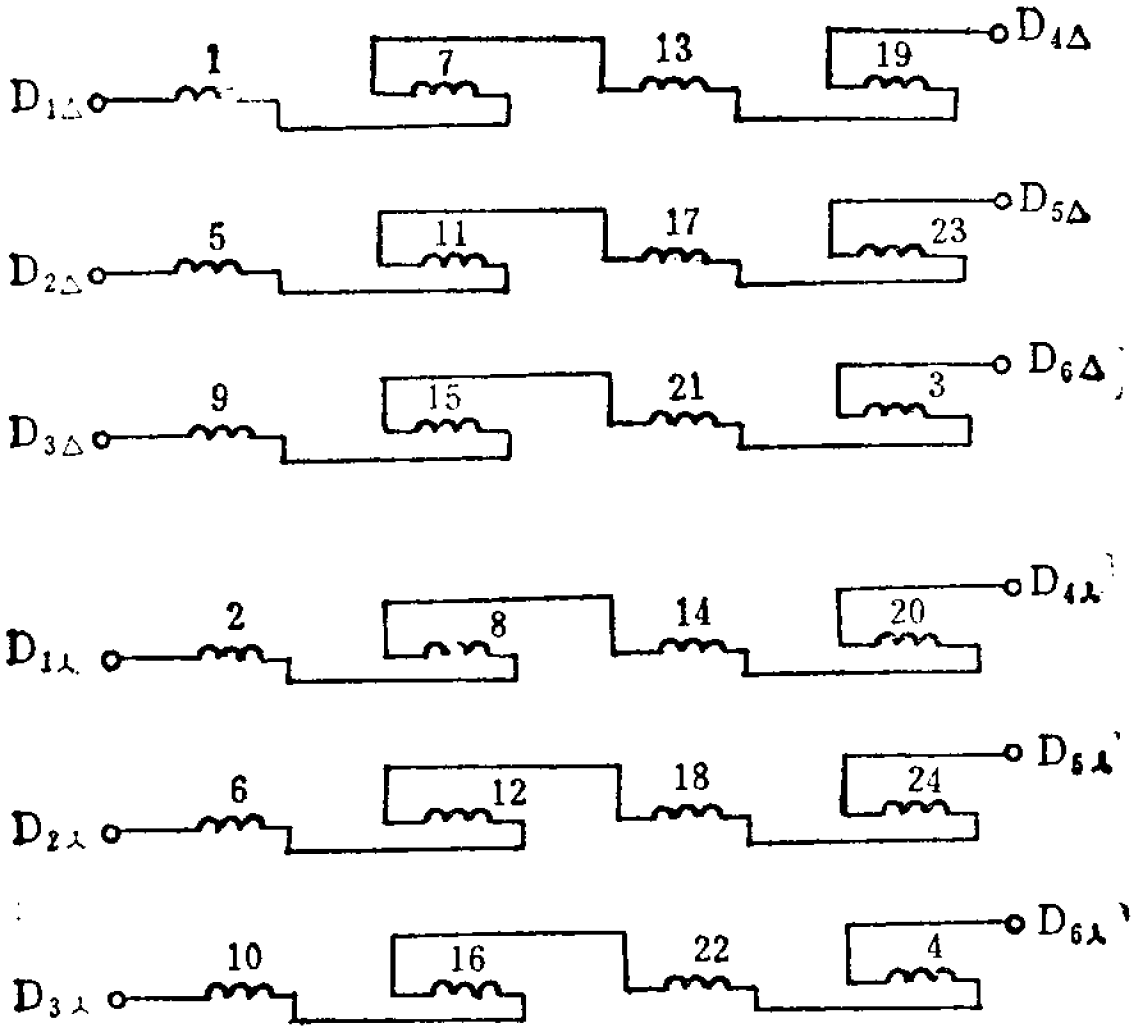


图3-10　正弦绕组中三角形与星形部分的相绕组简图

$D_{5\triangle}$；C相绕组的首端为 $D_{3\triangle}$，末端为 $D_{6\triangle}$。而星形部分A相绕组的首端为 $D_{1人}$，末端为 $D_{4人}$；B相绕组的首端为 $D_{2人}$，末端为 $D_{5人}$；C相绕组的首端为 $D_{3人}$，末端为 $D_{6人}$。

（5）根据相电势星形图及相绕组接线图，画出三角形与星形混合接成延边三角形（△）或星形-三角形（△）的正弦绕组的接线图。

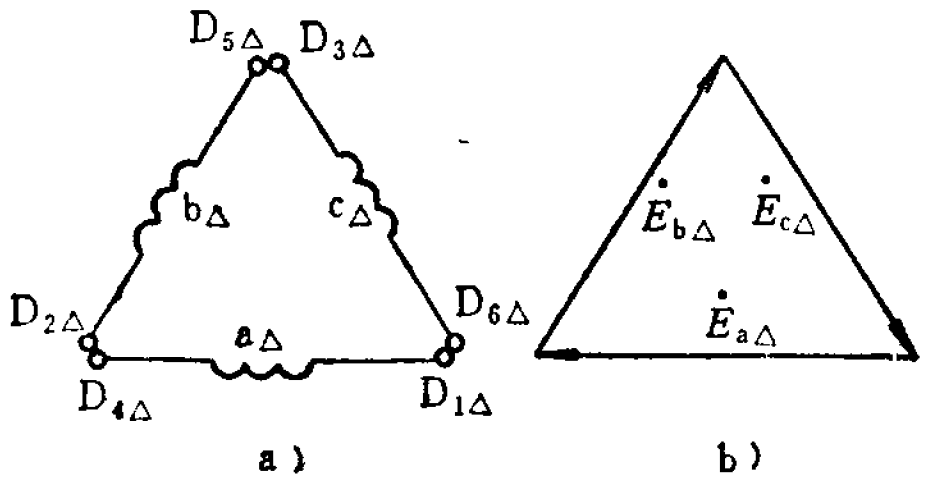


图3-11　三角形部分绕组连接图和相电势相量图

a）绕组连接图　b）相电势相量图

为了使混合接法时不致接错，这里介绍一种使相电势星形图

与混合接法的绕组接线图一致起来的画法。

首先，在对槽电势星形图中槽电势相量进行编号时，要注意到使相电势 $\dot{E}_{a\Delta}$ 的箭头方向朝左呈水平位置，如图3-11所示。因编号按顺时针方向进行，相电势 $\dot{E}_{a人}$ 滞后于 $\dot{E}_{a\Delta}$ 30°电角度，而相电势 $\dot{E}_{b人}$ 滞后于 $\dot{E}_{b\Delta}$ 120°电角度，$\dot{E}_{c人}$ 又滞后于 $\dot{E}_{c\Delta}$ 120°电角度。

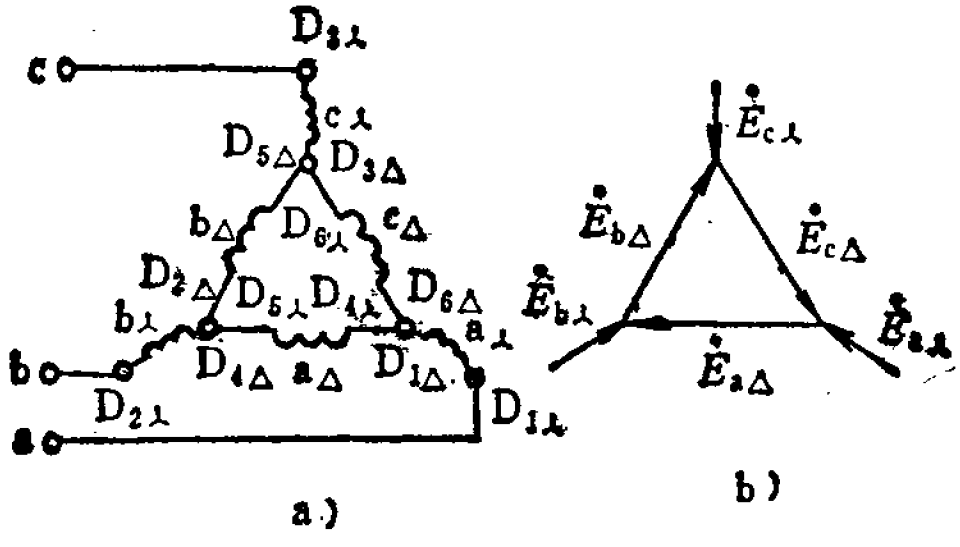


图3-12 “△”接法时正弦绕组

a）绕组连接图 b）相电势相量图

其次，是把三角形部分的三个相电势接成三角形，其相电势相量也呈三角形，如图 3-11 所示。

最后，把星形部分三个相绕组与三角形部分三个相绕组混合连接起来。当接成延边三角形时，其相电势相量图亦呈△，如图3-12所示；当接成星形-三角形时，其相电势相量图亦呈⧋形，如图3-13所示。

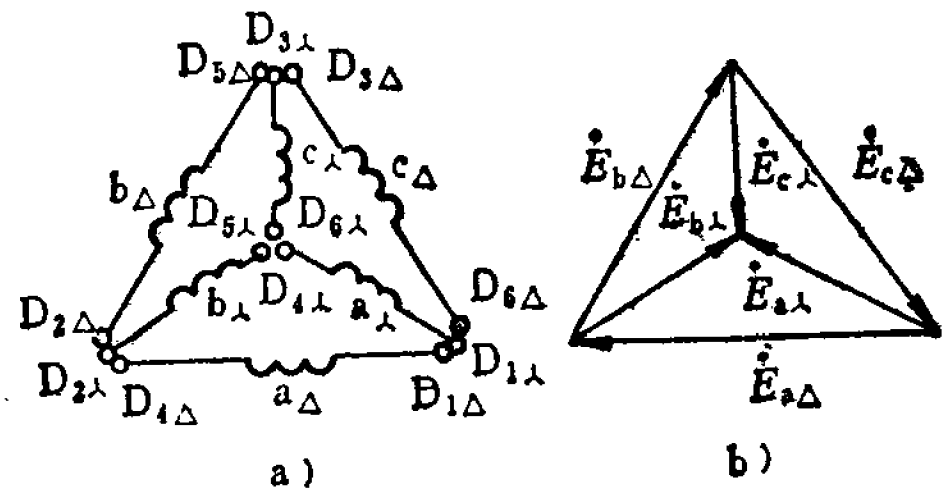


图3-13 “⧋”接法时正弦绕组

a）绕组连接图 b）相电势相量图

图 3-14 是 $Z_1 = 24$，$2p = 4$，△接法的正弦绕组的接线简图。有九根引出线，对容量较大的三相感应电动机可采用“人-△”起动法，就是在起动时将定子绕组接成星形，起动完毕后改接成延边三角形投入运行。这是充分利用正弦绕组优点的一个重要方面，

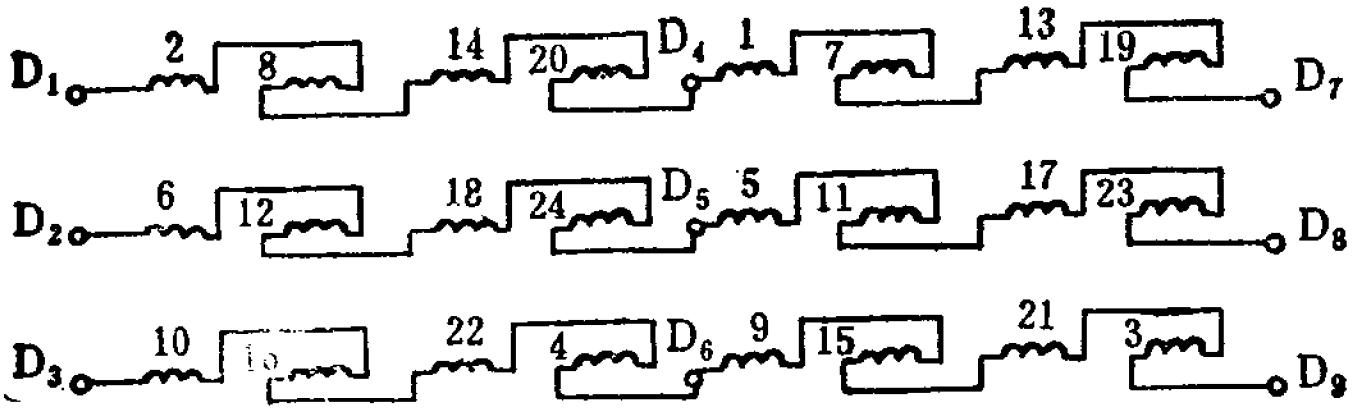


图3-14　$Z_1 = 24$、$2P = 4$ 的正弦绕组连接图

（接成△，并联支路数 $a_{\triangle} = a_{人} = 1$）

可以改善感应电动机的起动性能。这种起动方法和延边三角形起动法中最佳抽头比例时的效果同样好。

为了简化出线头的标号，在绕组简图中，我们已将三角形部分A相绕组的首端 $D_{1\triangle}$ 用 D_4 来表示，末端 $D_{4\triangle}$ 用 D_7 来表示；B相绕组的首端 $D_{2\triangle}$ 用 D_5 表示，末端 $D_{5\triangle}$ 用 D_8 表示；C相绕组的首端 $D_{3\triangle}$ 用 D_6 表示，末端 $D_{6\triangle}$ 用 D_9 表示。而星形部分A相绕组的首端 $D_{1人}$ 用 D_1 来表示，末端 $D_{4人}$ 用 D_4 来表示；B相绕组的首端 $D_{2人}$ 用 D_2 表示，末端 $D_{5人}$ 用 D_5 表示；C相绕组的首端 $D_{3人}$ 用 D_3 表示，末端 $D_{6人}$ 用 D_6 表示。

以上讨论的是从作出电势星形图确定绕组的排列、画出正弦绕组的接线图的方法，对于每极每相槽数 $q = \dfrac{Z_1}{6P} = 2$，4，6，8……，即 q 为偶数的情况都是适用的。另外，上例为正弦单层绕

组，对于正弦双层绕组也是适用的。

例题：定子槽数 $Z_1 = 48$，极数 $2p = 4$，说明正弦绕组的排列和连接。

1）由定子槽数 $Z_1 = 48$，极数 $2p = 4$，算出每槽电角度

$$\alpha = \frac{2p \times 180^\circ}{Z_1} = \frac{4 \times 180^\circ}{48} = 15^\circ$$

作出电势星形图。

2）利用槽电势星形图确定绕组的排列

正弦绕组分别按三角形部分和星形部分的每极每相槽数 $q_\triangle = q_人 = \frac{q}{2} = 2$（$q = \frac{Z_1}{6p} = \frac{48}{6 \times 2} = 4$）来进行排列。

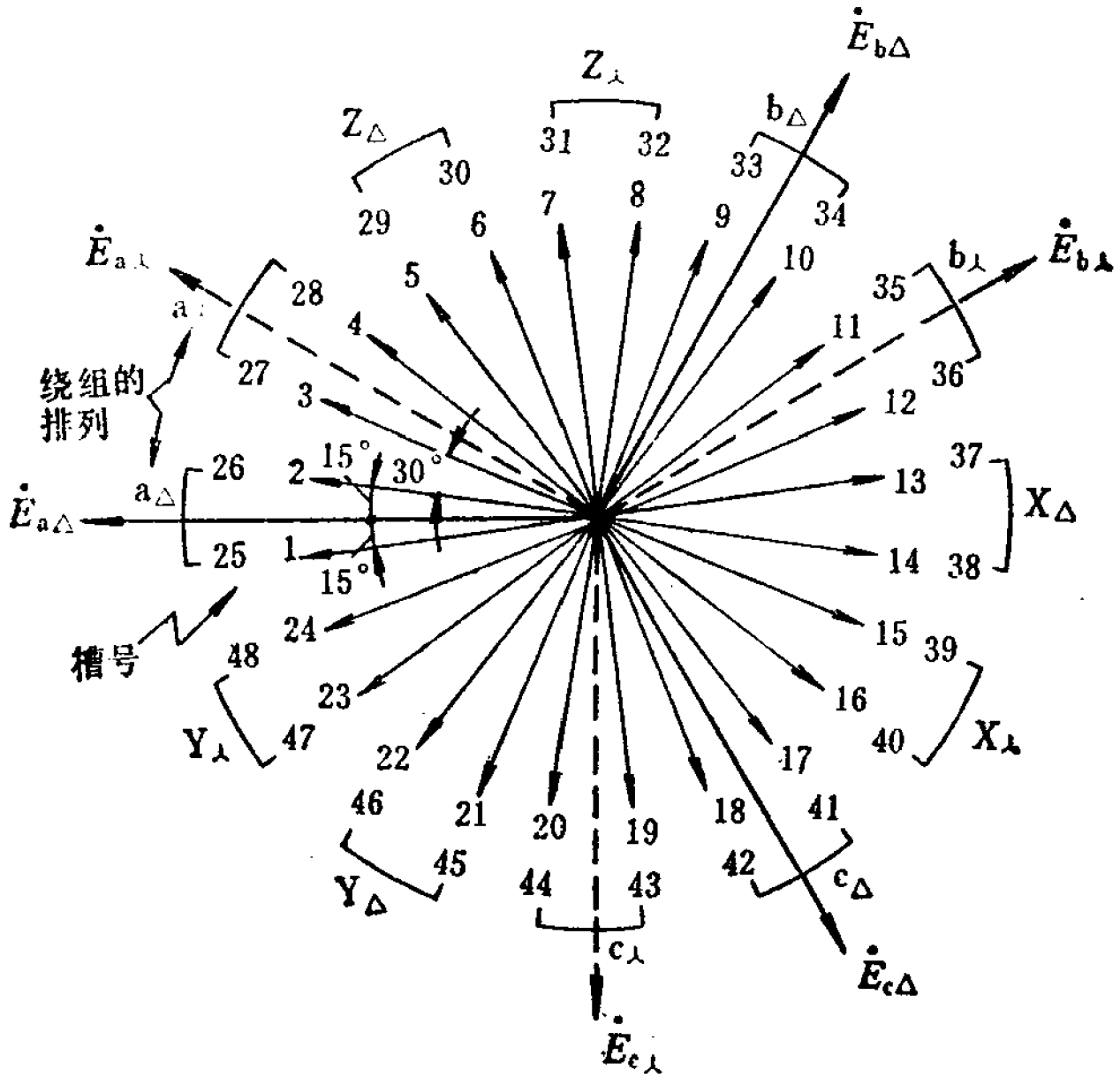


图3-15　$Z_1 = 48$，$2p = 4$ 槽电势星形及正弦绕组排列

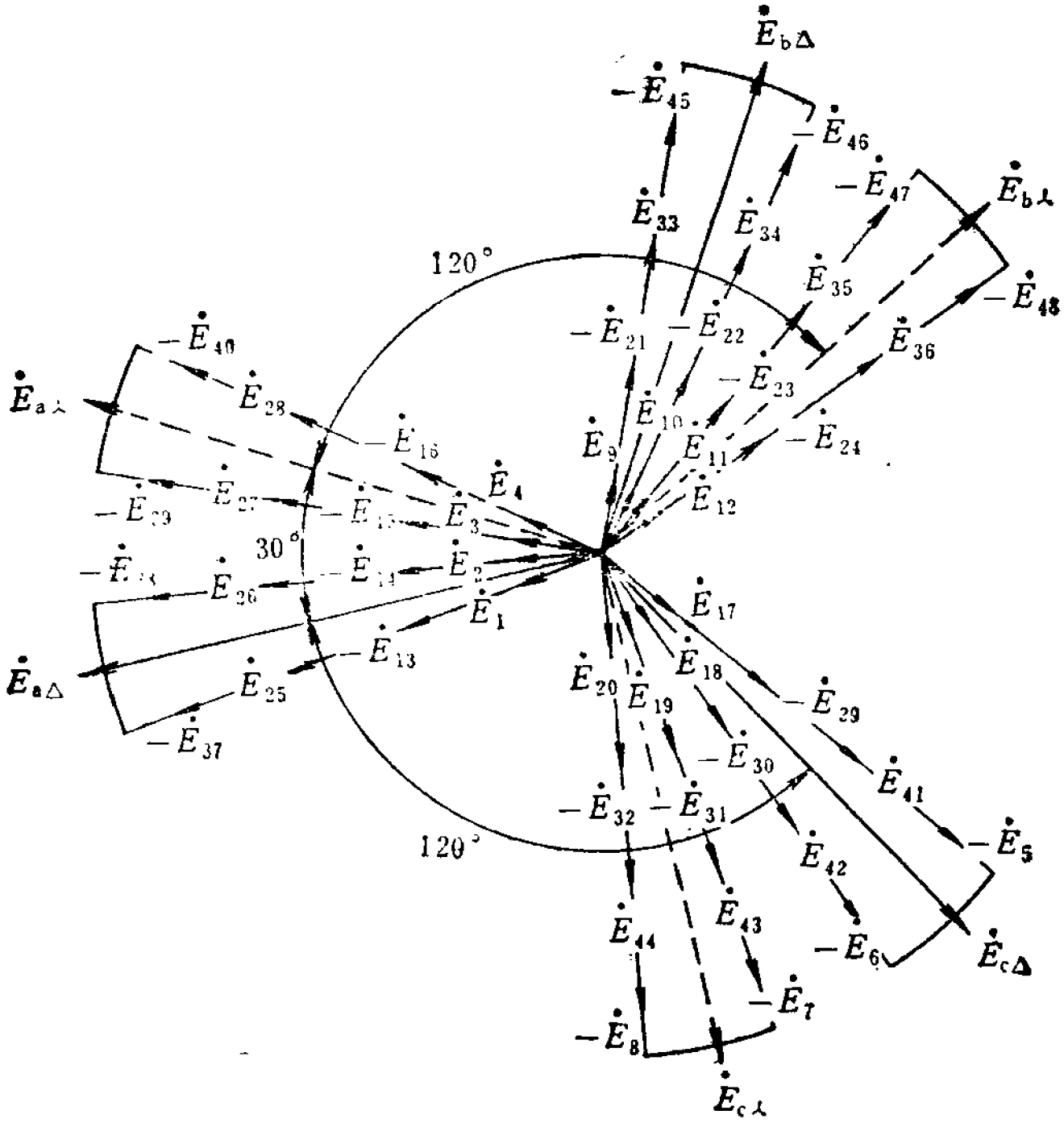


图3-16　$Z_1 = 48$，$2P = 4$ 正弦绕组相电势星形图

3）由槽电势星形图和绕组排列（图3-15）画出相电势星形图（图3-16）。

4）根据相电势星形图画出相绕组的平面展开图(图3-17)和接线图（图3-18）。为了便于接线，根据正弦绕组平面展开图可画出接线草图（图3-19）。

5）根据相电势星形图及相绕组接线图画出三角形与星形混合接成延边三角形△或星形-三角形△的正弦绕组的接线图（参看图3-12和3-13）。

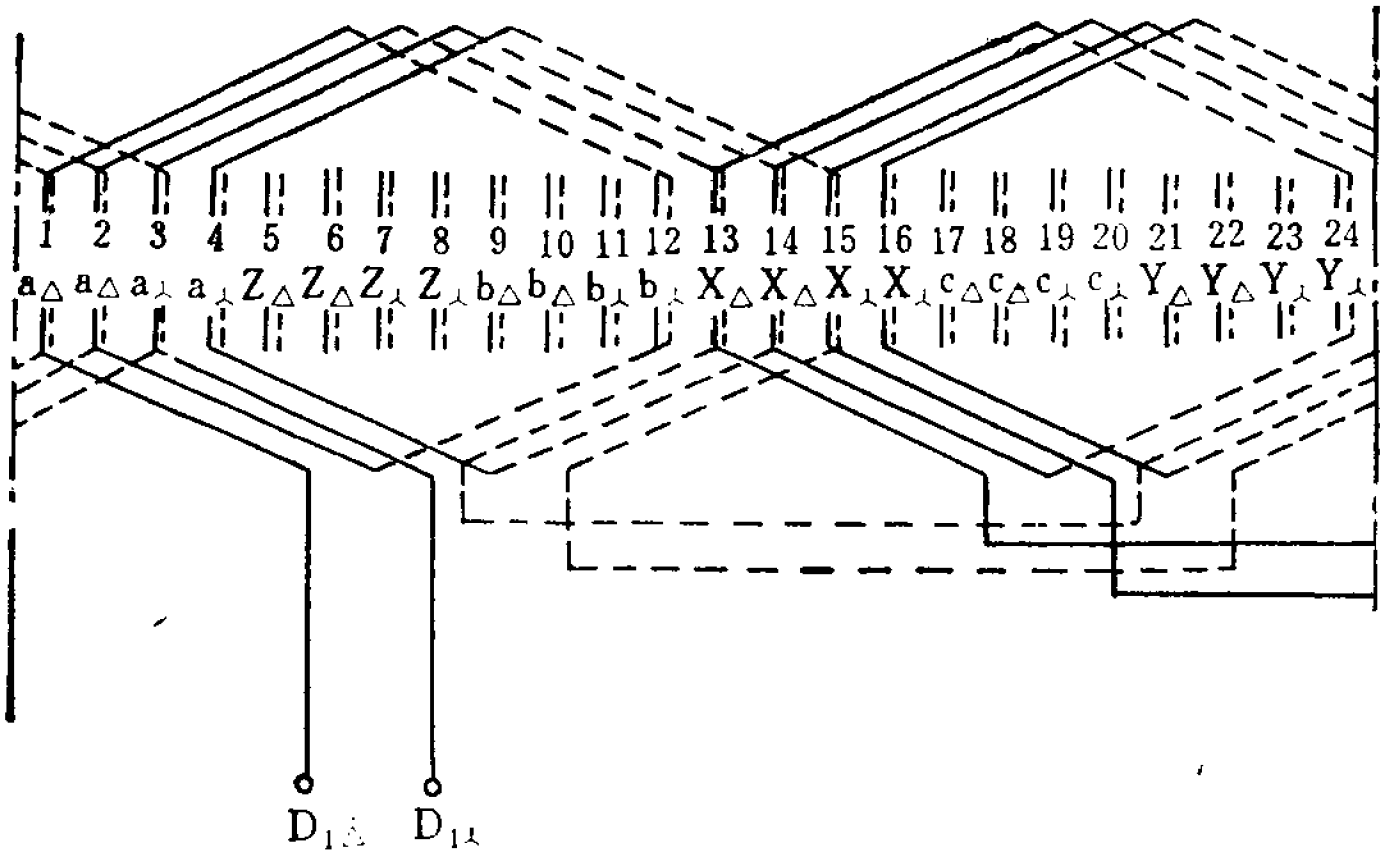


图3-17　$Z_1 = 48$，$2p = 4$ 正弦双层绕组中△与⅄部分 a 相绕组平面展开图

（$a_△ = a_⅄ = 1$）

2. 每极每相槽数 q 为奇数时正弦绕组的排列和连接方法

每极每相槽数 q 为奇数时，正弦绕组有三种可供选择的排列

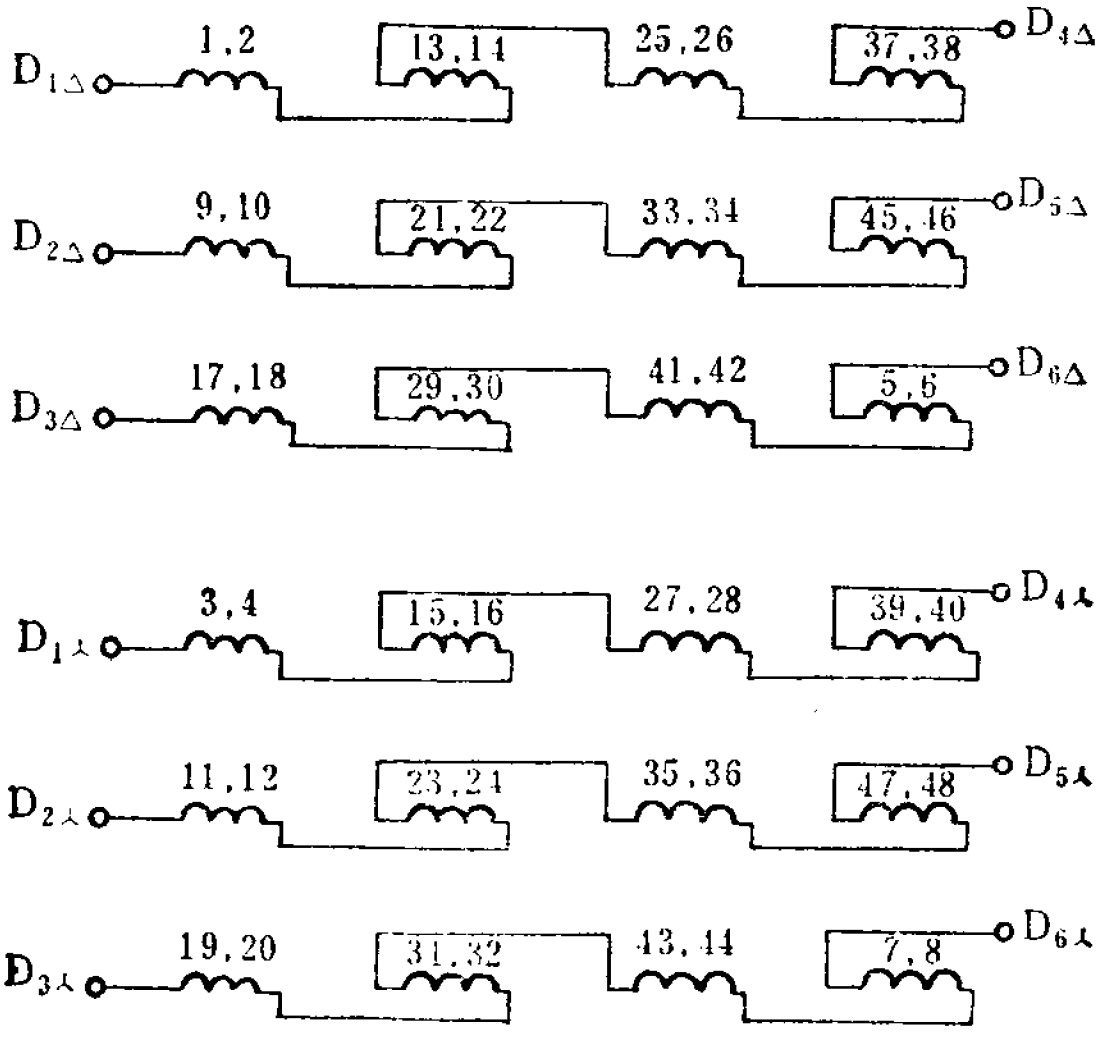


图3-18　$Z_1 = 48$，$2p = 4$ 正弦绕组中△与人部分相绕组简图

($a_{\triangle} = a_{人} = 1$)

方法。这里，我们以定子槽数 $Z_1 = 36$，极数 $2p = 4$ 为例来说明 q 为奇数时正弦绕组轮换排列和不轮换排列方法。第三种排列方法将在改极重绕中阐述。

轮换排列的特点是在第一个极距内，三角形部分比星形部分多占一个槽，而在第二个极距内，星形部分较三角形部分多占一个槽。第二对极与第一对极排列的情况相同。

（1）由定子槽数 $Z_1 = 36$，极数 $2p = 4$，算出每槽电角度作出电势星形图

$$\alpha = \frac{2p \times 180^\circ}{Z_1} = \frac{4 \times 180^\circ}{36} = 20^\circ$$

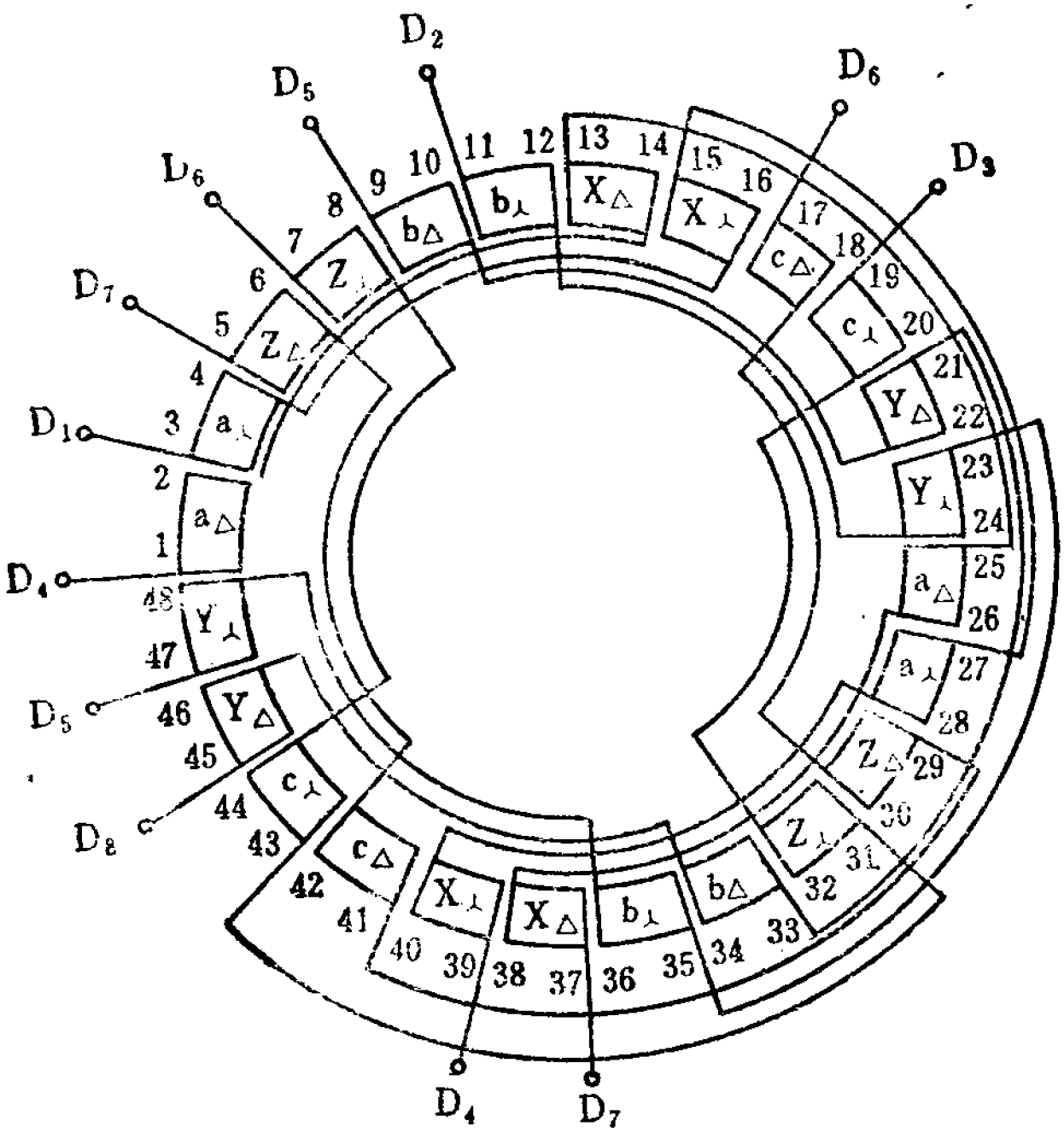


图3-19　$Z_1 = 48$、$2p = 4$ 正弦绕组接线草图

（$a_△ = a_人 = 1$）

（2）利用槽电势星形图确定绕组的排列

正弦绕组三角形部分和星形部分每极每相槽数 $q_△ = q_人 = \frac{q}{2} = \frac{3}{2}$（其中 $q = \frac{Z_1}{6p} = \frac{36}{6 \times 2} = 3$ = 奇数），按照轮换排列原则，即在第一个极距内，三角形部分比星形部分多占一个槽，例如，1、2两号槽属于A相三角形部分，3号槽属于A相星形部分，其余类推。而在第二个极距内，则星形部分较三角形部分多占一个槽，例如，10号槽属于A相三角形部分，11、12两号槽属于A相星形部分，其余类推。其绕组排列如图3-20所示。

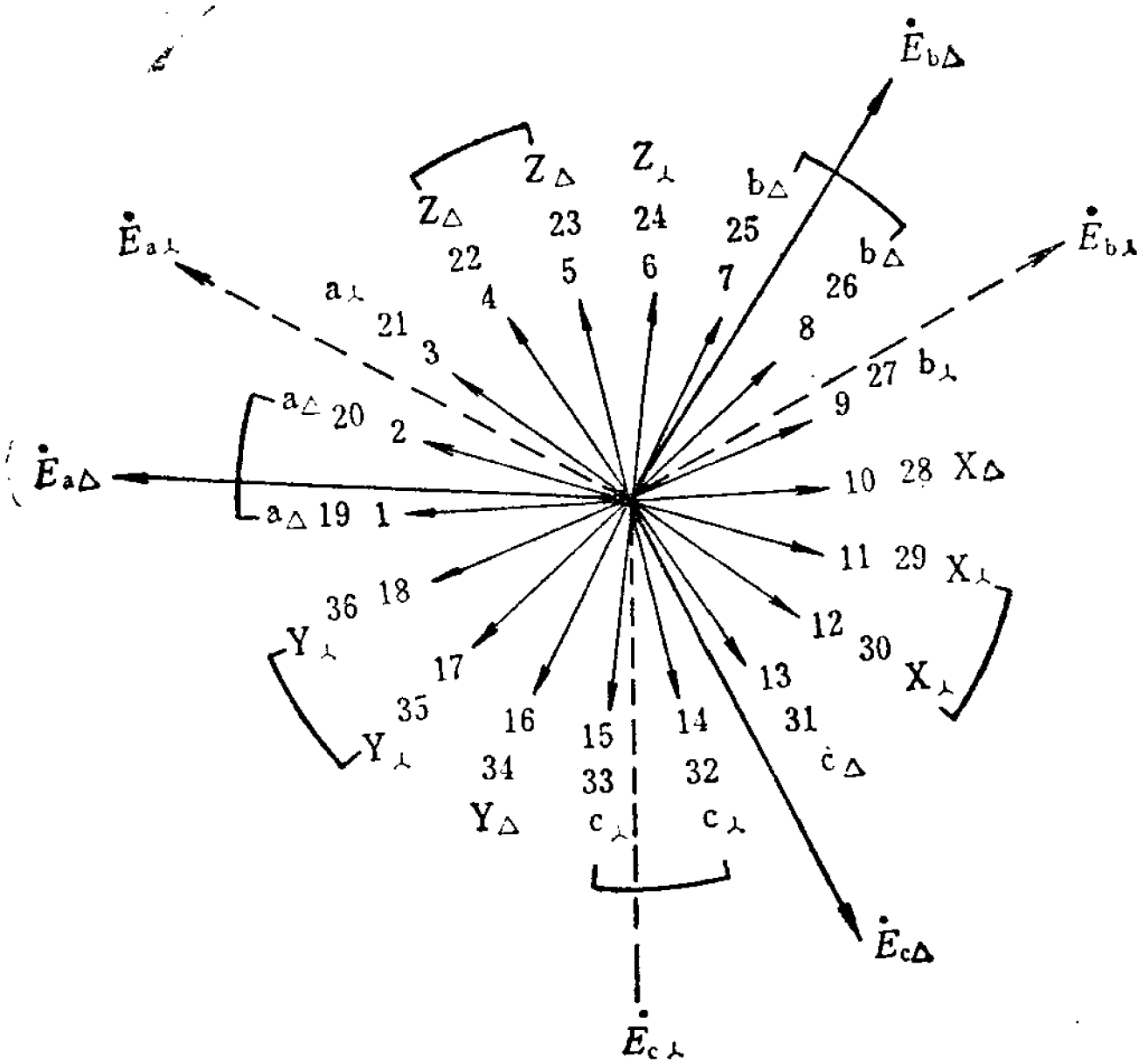


图3-20　$Z_1 = 36$、$2p = 4$ 电势星形图及正弦绕组轮换排列

（3）由槽电势星形图和绕组排列画出相电势星形图（图3-20）。

（4）根据相电势星形图可以画出相绕组的平面展开图和接线草图（图3-21、3-22和3-23）。

（5）根据相电势星形图及相绕组接线图，画出三角形与星形混合接成延边三角形△或星形-三角形△的正弦绕组的接线图（参看图3-12和3-13）。

不轮换排列是在每个极距内，每相三角形部分比星形部分多占一个槽。当每极每相槽数 $q = 3$ 时，取 $q_\triangle = 2$、$q_\perp = 1$，可画出绕组排列和平面展开图（图3-24）以及接线草图（图3-25）。

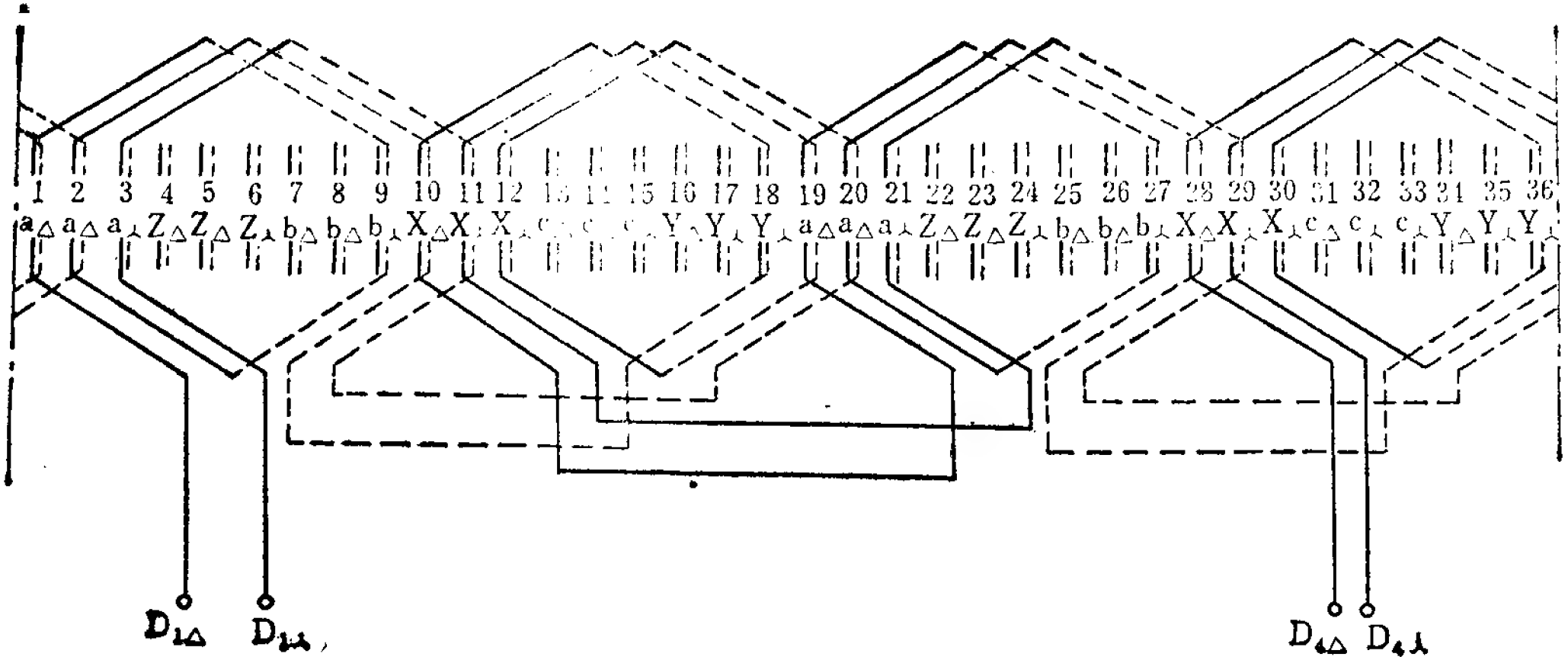


图3-21　$Z_1 = 36$、$2P = 4$ 正弦绕组(轮换排列)平面展开图

($a_\triangle = a_\curlywedge = 1$)

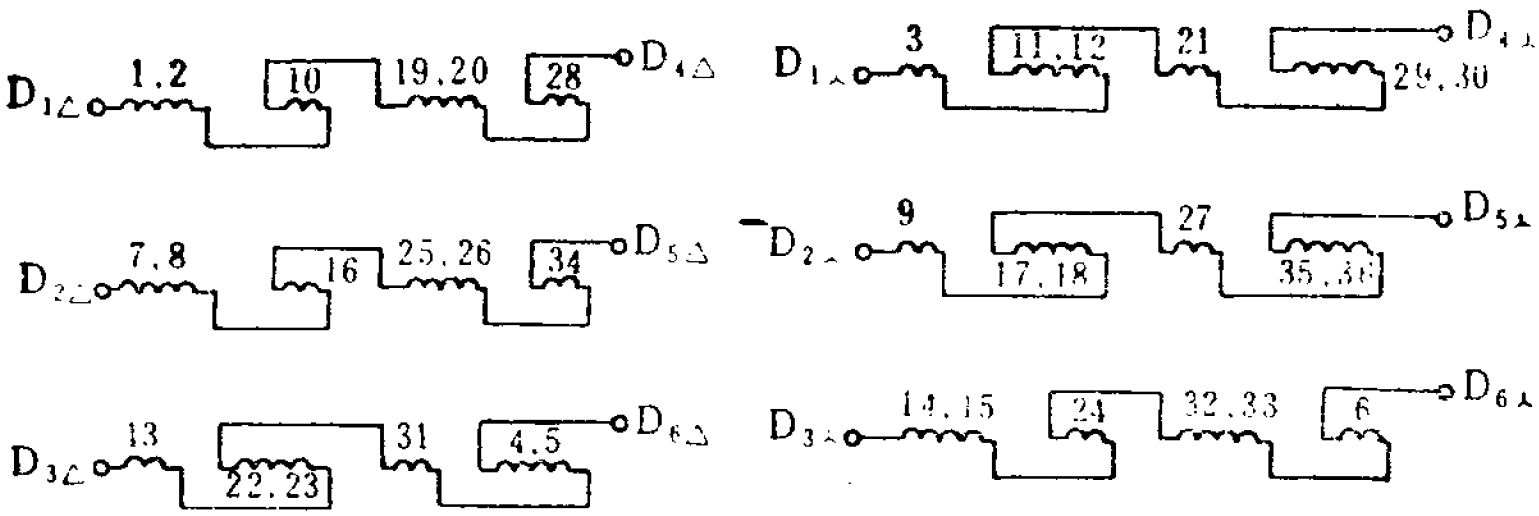


图3-22　$Z_1 = 36$、$2p = 4$ 正弦绕组简图

($a_△ = a_人 = 1$)

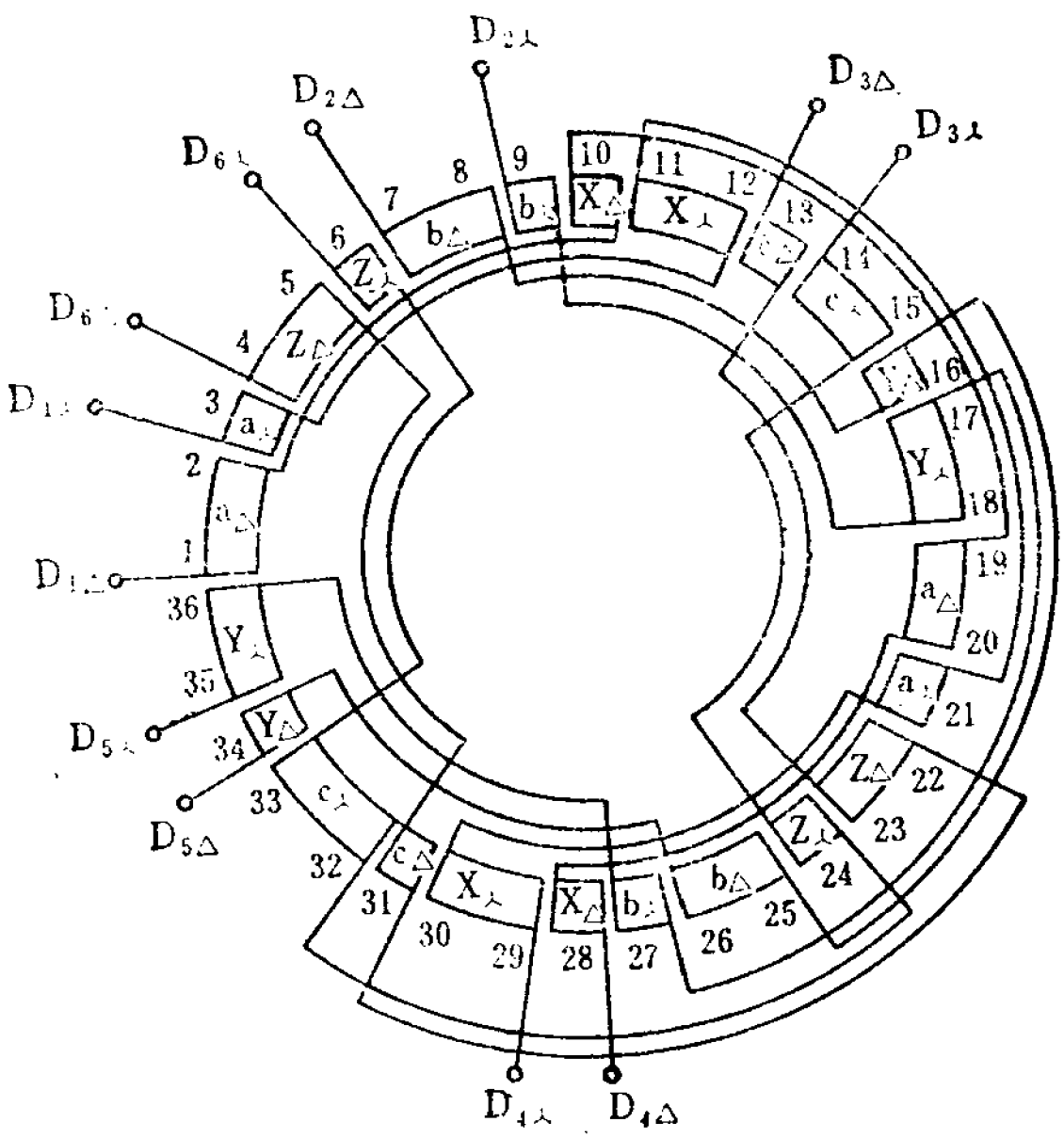


图3-23　$Z_1 = 36$、$2p = 4$ 正弦绕组轮换排列接线草图

($a_△ = a_人 = 1$)

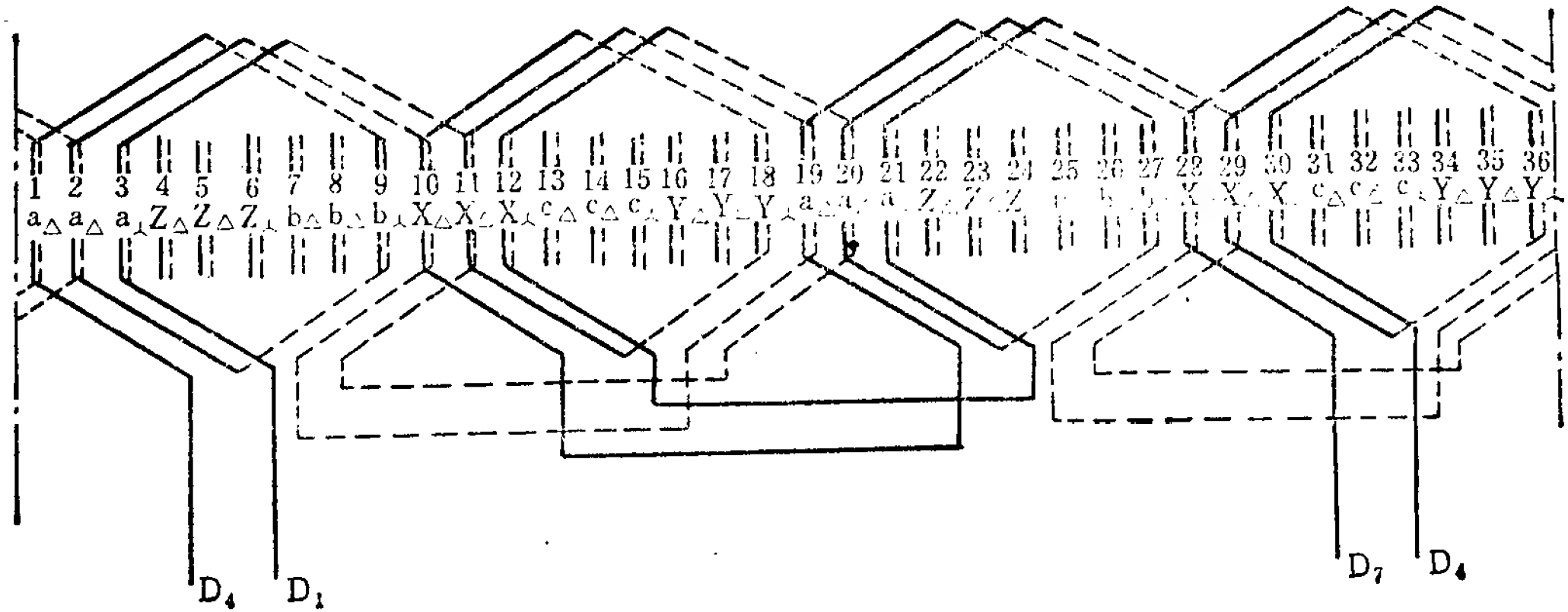


图3-24　$Z_1 = 36$、$2p = 4$ 正弦绕组（不轮换排列）平面展开图

（$a_{\triangle} = a_{人} = 1$）

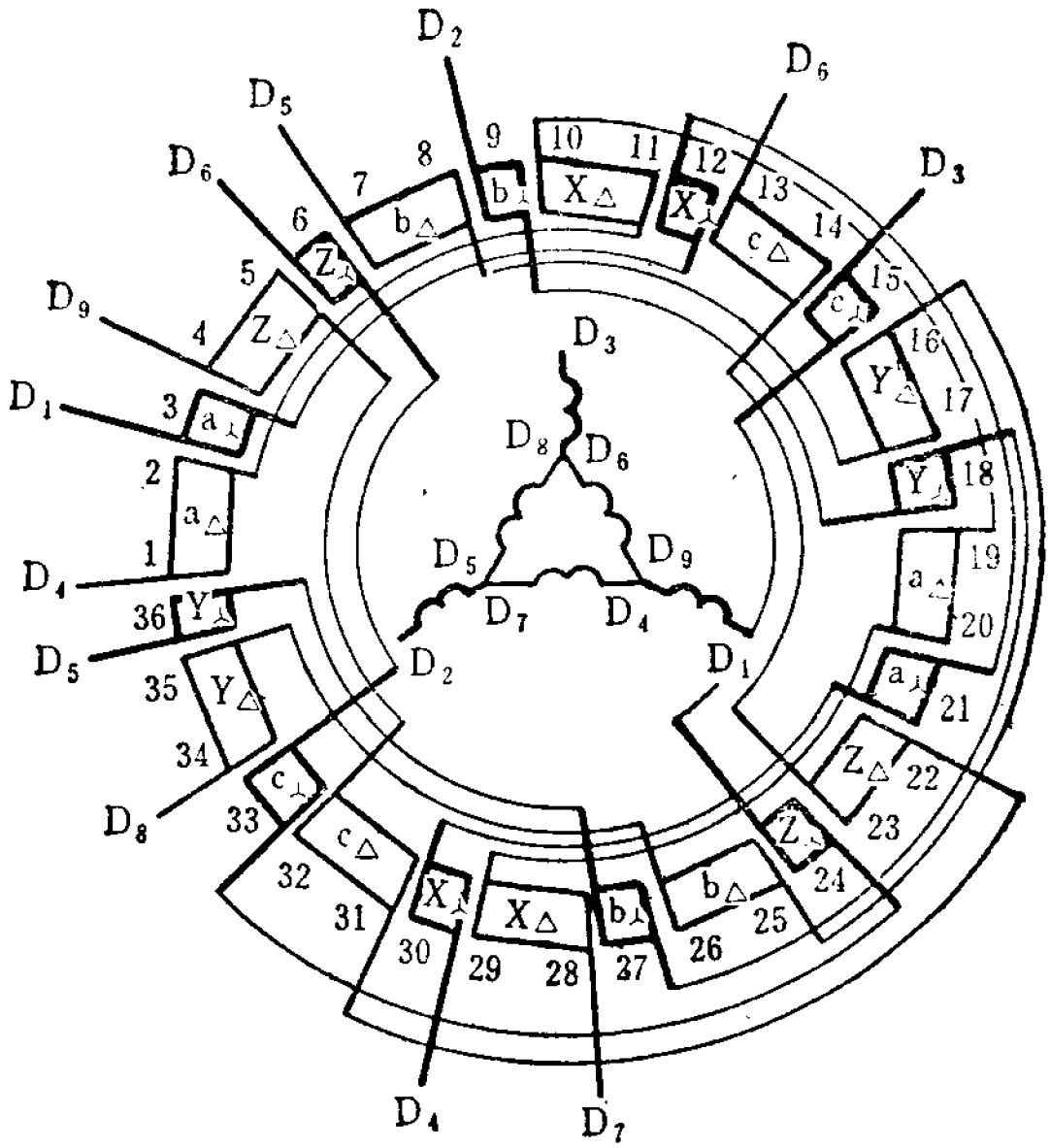


图3-25　$Z_1 = 36$、$2p = 4$ 正弦绕组不轮换排列接线草图

（$a_{\triangle} = a_{人} = 1$）

四、三相绕组改成正弦绕组简易计算

在感应电动机修理中，将原三相绕组改成正弦绕组，其绕组数据可由简易计算公式求得。现以原三相绕组星形（人）连接改成正弦绕组延边三角形（△）连接为例予以说明。

（一）串联导体截面的确定

原三相绕组星形人连接（图4-1 a）

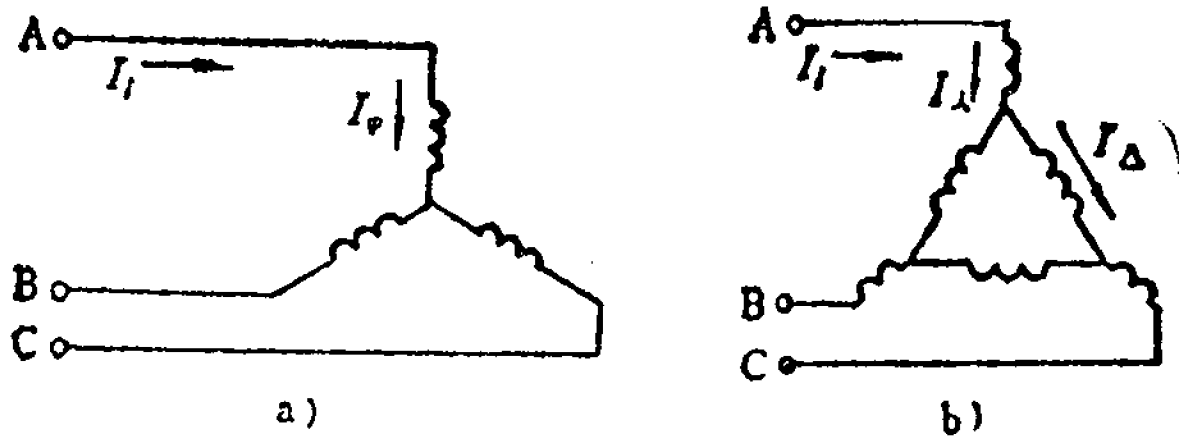


图4-1　原三相绕组人连接改成正弦绕组△连接

a）原三相绕组人连接　b）正弦绕组△连接

电流　　$I_\varphi = I_l$

电流密度　　$J = \dfrac{I_\varphi}{A_c}$　（A/mm²）

式中　I_φ——相电流（A）；

I_l——线电流（A）；

A_c——串联导体截面积（mm²）。

正弦绕组延边三角形（△）连接（图4-1 b）

星形部分：

电流　　$I_人 = I_l = I_\varphi$

电流密度　　$J_人 = \dfrac{I_人}{A_人} = \dfrac{I_l}{A_人} = \dfrac{I_\varphi}{A_人}$

式中　$I_人$——星形部分相电流（A）；

$J_人$——星形部分电流密度（A/mm²）；

$A_人$——星形部分串联导体截面（mm²）。

三角形部分：

电流　　$I_\Delta = \dfrac{1}{\sqrt{3}} I_人 = \dfrac{1}{\sqrt{3}} I_l = \dfrac{1}{\sqrt{3}} I_\varphi$

电流密度　$J_\Delta = \dfrac{I_\Delta}{A_\Delta} = \dfrac{1}{\sqrt{3}} \dfrac{I_人}{A_\Delta} = \dfrac{1}{\sqrt{3}} \dfrac{I_l}{A_\Delta} = \dfrac{1}{\sqrt{3}} \dfrac{I_\varphi}{A_\Delta}$

式中　I_Δ——三角形部分相电流（A）；

$I_{\triangle}$——三角形部分电流密度（A/mm²）；

$A_{\triangle}$——三角形部分串联导体截面（mm²）。

为了保持电流密度不变，即

$$J = J_{人} = I_{\triangle}$$

所以

$$A_{人} = A_{\triangle}$$

$$A_{\triangle} = \frac{1}{\sqrt{3}} A_{人} = \frac{1}{\sqrt{3}} A_{\triangle}$$

因此，正弦绕组延边三角形（△）连接星形（人）部分导体截面与原三相绕组星形连接的导体截面相等，而三角形（△）部分导体截面则为原三相绕组星形连接的导体截面的$\frac{1}{\sqrt{3}}$。

（二）每相匝数和每槽导体数的确定

1. 三角形（△）部分与星形（人）部分线圈匝数的配合

在正弦绕组中，三角形部分每相匝数$w_{\triangle}$和星形部分每相匝数$w_{人}$配合$\left(\frac{w_{\triangle}}{w_{人}}\right)$必须得当，方能消除或削弱高次谐波。由正弦绕组构成原理可知，星形部分相电流有效值为三角形部分的$\sqrt{3}$倍，即$I_{人} = \sqrt{3} I_{\triangle}$，为了使定子每槽电流总安匝的有效值相同，应使三角形部分每个线圈匝数$w_{1\triangle}$为星形部分每个线圈匝数$w_{1人}$的$\sqrt{3}$倍，即$w_{1\triangle} = \sqrt{3} w_{1人}$。

当$\frac{a_{人}（星形部分并联支路数）}{a_{\triangle}（三角形部分并联支路数）} = 1$时，三角形部分与星形部分线圈匝数的配合$\frac{w_{1\triangle}}{w_{1人}} = \sqrt{3}$，符合这一关系的匝数有$\frac{w_{1\triangle}}{w_{1人}}$：

$\frac{7}{4}$、$\frac{12}{7}$、$\frac{14}{8}$、$\frac{17}{10}$、$\frac{19}{11}$、$\frac{21}{12}$、$\frac{26}{15}$、$\frac{31}{18}$、$\frac{33}{19}$、$\frac{38}{22}$、$\frac{40}{23}$、$\frac{45}{26}$、$\frac{47}{27}$、$\frac{50}{29}$、$\frac{52}{30}$、$\frac{59}{34}$……

由于三角形部分与星形部分线圈个数相等，因此，三角形部分每相匝数 $w_{\triangle}$ 应为星形部分每相匝数 $w_{人}$ 的 $\sqrt{3}$ 倍，即 $w_{\triangle}=\sqrt{3}w_{人}$。

2. 三角形部分与星形部分每相匝数和每槽导体数的确定

（1）电压分配

因为正弦绕组延边三角形连接的三角形部分每相绕组匝数为星形部分的 $\sqrt{3}$ 倍，故三角形部分每相串联导体总长度 $l_{\triangle}$ 为星形部分每相串联导体总长度 $l_{人}$ 的 $\sqrt{3}$ 倍，即

$$l_{\triangle}=\sqrt{3}\,l_{人}$$

又因为三角形部分串联导体截面 $A_{\triangle}$ 为星形部分串联导体截面 $A_{人}$ 的 $\frac{1}{\sqrt{3}}$，即

$$A_{\triangle}=\frac{1}{\sqrt{3}}A_{人}$$

所以，三角形部分每相电阻 $R_{\triangle}$ 为星形部分每相电阻 $R_{人}$ 的 3 倍，即

$$R_{\triangle}=\rho\frac{l_{\triangle}}{A_{\triangle}}=\rho\frac{\sqrt{3}\,l_{人}}{\frac{1}{\sqrt{3}}A_{人}}=3\rho\frac{l_{人}}{A_{人}}=3R_{人}$$

式中，ρ 为电阻系数。

而绕组电抗与绕组匝数平方成正比，所以，三角形部分每相绕组电抗 $X_{\triangle}$ 也为星形部分每相绕组电抗 $X_{人}$ 的 3 倍，即

$$\frac{X_{\triangle}}{X_{Y}}=\left(\frac{w_{\triangle}}{w_{人}}\right)^2=\left(\frac{\sqrt{3}\,w_{人}}{w_{人}}\right)^2=3$$

或

$$X_{\triangle}=3X_{人}$$

因而，正弦绕组三角形部分每相绕组阻抗 $Z_{\triangle}$ 为星形部分每相绕组阻抗 $Z_{人}$ 的 3 倍，即

$$Z_{\triangle}=\sqrt{R_{\triangle}^2+X_{\triangle}^2}=\sqrt{(3R_{人})^2+(3X_{人})^2}=3\sqrt{R_{人}^2+X_{人}^2}=3Z_{人}$$

现将延边三角形中的三角形部分用等值星形代替（图4-2），则等值星形每相阻抗 $Z'_{人}$ 与正弦绕组中星形部分每相阻抗 $Z_{人}$ 相等，即

$$Z'_{人}=\frac{Z_{\triangle}\cdot Z_{\triangle}}{Z_{\triangle}+Z_{\triangle}+Z_{\triangle}}=\frac{Z_{\triangle}}{3}=Z_{人}$$

在等值电路每相绕组中电压的分配可近似认为与阻抗成正比。当外施相电压 U_{φ} 为220 V，则分配在星形部分相电压 $U_{人}$ 为110 V。

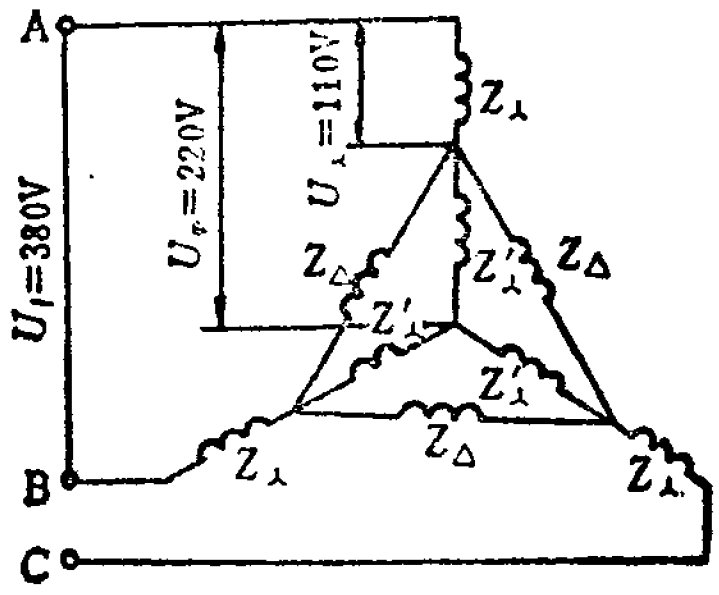


图4-2　电压分配

（2）星形部分每相匝数 $w_{人}$ 和每槽导体数 $N_{人}$

在原三相绕组星形连接中相电压 $U_{\varphi}=220$ V，每相匝数为 w_{φ}，为了保持每匝电压不变，则正弦绕组延边三角形连接星形部分由于相电压 $U_{人}=\frac{1}{2}U_{\varphi}=110$ V，所以，每相匝数 $w_{人}=\frac{1}{2}w_{\varphi}$。而在正弦绕组中，每极每相槽数为三相绕组的每极每相槽数的一半，即 $q_{人}=q_{\triangle}=\frac{1}{2}q$，所以，每槽导体数保持不变，即

$$N_{人}=N_s$$

式中，N_s 为原三相绕组每槽导体数。

（3）三角形部分每相匝数 $w_{\triangle}$ 和每槽导体数 $N_{\triangle}$

在正弦绕组中，三角形部分每相匝数 $w_{\triangle}$ 为星形部分每相匝数 $w_{人}$ 的 $\sqrt{3}$ 倍，故三角形部分每槽导体数 $N_{\triangle}$ 也为星形部分每槽导体数 $N_{人}$ 的 $\sqrt{3}$ 倍，即

$$N_{\triangle}=\sqrt{3}N_{人}=\sqrt{3}N_s$$

用同样的分析方法可得三相绕组星形连接改成正弦绕组星

形-三角形连接及三相绕组三角形连接改成正弦绕组延边三角形连接或星形-三角形连接的绕组简易计算公式。现列表如下：

正弦绕组接法 / 每槽导体数和导体截面积 / 原三相绕组接法	正弦绕组△连接		正弦绕组⏢连接	
	星形部分	三角形部分	星形部分	三角形部分
三相绕组人连接	$N_{人}=N_s$ $A_{人}=A_c$	$N_{\triangle}=\sqrt{3}N_s$ $A_{\triangle}=\frac{1}{\sqrt{3}}A_c$	$N_{人}=2N_s$ $A_{人}=\frac{1}{2}A_c$	$N_{\triangle}=2\sqrt{3}N_s$ $A_{\triangle}=\frac{1}{2\sqrt{3}}A_c$
三相绕组△连接	$N_{人}=\frac{1}{\sqrt{3}}N_s$ $A_{人}=\sqrt{3}A_c$	$N_{\triangle}=N_s$ $A_{\triangle}=A_c$	$N_{人}=\frac{2}{\sqrt{3}}N_s$ $A_{人}=\frac{\sqrt{3}}{2}A_c$	$N_{\triangle}=2N_s$ $A_{\triangle}=\frac{1}{2}A_c$

以上计算未考虑正弦绕组的绕组系数已比三相绕组有所提高这一因素。为了使感应电动机修理前后的气隙磁密值保持不变，应使对应于相应电压的绕组其每相有效串联导体数在修理前后也是不变的。在一般情况下，正弦绕组的分布系数比三相绕组提高约3%；同时，若正弦绕组采用线圈节距 $y=\frac{11}{12}\tau$（正弦绕组的线圈节距，主要应考虑削弱11次和13次谐波，同时又要使基波有尽可能高的短距系数，通常应取 $y=\frac{11}{12}\tau$，τ 为极距），而原三相绕组 $y=\frac{5}{6}\tau$，则前者短距系数比后者提高约2.5%。于是，正弦绕组的绕组系数比三相绕组提高约3%（对单层绕组和双层整距绕组）或6%（对双层短距绕组）。考虑到正弦绕组的绕组系数较原三相绕组有所提高，由上表简易公式算得的每槽导体数 $N_{人}$ 和 $N_{\triangle}$ 应乘上0.97（对单层绕组和双层整距绕组）或0.94（对

双层短距绕组)。由于每槽导体数减少,考虑到保持槽满率不变,可适当增大正弦绕组的导体截面积。由上表简易公式算得的导体截面积 $A_{人}$和 $A_{△}$应乘上$\frac{1}{0.97}$倍（对单层绕组和双层整距绕组）或$\frac{1}{0.94}$倍(对双层短距绕组)。这一修正使所修理的感应电动机在保持铁耗不变的情况下,降低了定子绕组铜耗。鉴于小型(2、4极)电动机中定子铜耗占全部损耗的比重较大,且旧电机磁路一般饱和程度不变,因此,对原（齿、轭中）磁通密度不高的电机,还可使线圈匝数略微减少一些,在保持槽满率不变的情况下,导体截面还可略微增大一些,以进一步降低其定子铜耗,因而使电机性能进一步得到改善,节能效果更好。

例1：将一台 JO2-22-4 三相感应电动机的三相绕组改成正弦绕组,计算正弦绕组的绕组数据。

原三相绕组的数据为:

定子槽数　$Z_1 = 24$

每槽导体数　$N_s = 63$

导线线规　1-ϕ0.83mm 高强度聚酯漆包圆铜线

绕组型式　单层链式

接法　人

并联支路　$a = 1$

1）每槽导体数和每线圈匝数

由于原三相绕组为人连接,每槽导体数 $N_s = 68$,根据正弦绕组简易计算公式可得:

正弦绕组为△连接:

人部分每槽导体数　$N_{人} = 0.97N_s = 0.97 \times 68 = 65.96$

取　$N_{人} = 66$

△部分每槽导体数　$N_{△} = 0.97 \times \sqrt{3} N_s = 0.97 \times \sqrt{3} \times 68$

$$= 114.24$$

取 $N_{\triangle} = 114$

正弦绕组为△连接：

人部分每槽导体数 $N_{人} = 0.97 \times 2N_s = 0.97 \times 2 \times 68 = 131.92$

取 $N_{人} = 132$

△部分每槽导体数 $N_{\triangle} = 0.97 \times 2\sqrt{3} N_s = 0.97 \times 2 \times \sqrt{3} \times 68$

$$= 228.49$$

取 $N_{\triangle} = 229$

式中，0.97 是考虑到正弦绕组的分布系数比三相绕组提高约 3% 的修正系数。由于绕组为单层，正弦绕组与三相绕组的短距系数均为 1，故不需考虑对短距系数的修正。

因为单层绕组每线圈匝数即为每槽导体数，所以

正弦绕组为△连接：

人部分每线圈匝数 $w_{1人} = N_{人} = 66$

△部分每线圈匝数 $w_{1\triangle} = N_{\triangle} = 114$

正弦绕组为△连接：

人部分每线圈匝数 $w_{1人} = N_{人} = 132$

△部分每线圈匝数 $w_{1\triangle} = N_{\triangle} = 229$

·2）导线线规

由于原三相绕组为人连接，导线线规为 1 - ϕ0.83mm，其截面积为 $A_c = 0.541\text{mm}^2$，根据正弦绕组简易计算公式可得

正弦绕组为△连接：

人部分导线截面积 $A_{人} = \frac{1}{0.97} A_c = \frac{1}{0.97} \times 0.541 = 0.5577(\text{mm}^2)$

选用线规 1 - ϕ0.83mm

△部分导线截面积 $A_{\triangle} = \frac{1}{0.97} \times \frac{1}{\sqrt{3}} A_c = \frac{1}{0.97} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \times 0.541$

$$=0.322\ (\mathrm{mm^2})$$

选用线规　1 − ϕ0.64mm

正弦绕组为△连接：

人部分导线截面积　$A_{人}=\frac{1}{0.97}\times\frac{1}{2}A_c=\frac{1}{0.97}\times\frac{1}{2}\times0.541$

$$=0.2789\ (\mathrm{mm^2})$$

选用线规　1 − ϕ0.59mm

△部分导线截面积　$A_{\triangle}=\frac{1}{0.97}\times\frac{1}{2\sqrt{3}}A_c=\frac{1}{0.97}\times\frac{1}{2\sqrt{3}}$

$$\times0.541=0.161\ (\mathrm{mm^2})$$

选用线规　1 − ϕ0.44mm

式中，$\frac{1}{0.97}$也是考虑到正弦绕组的分布系数比三相绕组提高约3%的修正系数。

例2：将一台 JO2-62-4 三相感应电动机的三相绕组改成正弦绕组，计算正弦绕组的绕组数据。

原三相绕组的数据为：

定子槽数　$Z_1=36$

每槽导体数　$N_s=2\times$每个线圈匝数$=2\times21=42$

导线线规　1 − ϕ1.45mm 高强度聚酯漆包圆铜线

绕组型式　双层叠绕

接法　△

并联支路　$a=2$

1）每槽导体数和每线圈匝数

由于原三相绕组为△连接，每槽导体数 $N_s=42$，根据正弦绕组简易计算公式可得

正弦绕组为△连接：

人部分每槽导体数　$N_{人}=0.94\times\frac{1}{\sqrt{3}}N_s=22.79$

取　$N_{人}=22$

△部分每槽导体数　$N_{△}=0.94N_{s}=39.48$　取 $N_{△}=38$

正弦绕组为△连接：

人部分每槽导体数　$N_{人}=0.94\times\frac{2}{\sqrt{3}}N_{s}=45.59$取46

△部分每槽导体数　$N_{△}=0.94\times2N_{s}=78.96$取80

式中，0.94是考虑到正弦绕组的绕组系数比三相绕组提高 约 6%（对双层短距绕组）的修正系数。

因为双层绕组每线圈匝数为每槽导体数的一半，所以

正弦绕组为△连接：

人部分每线圈匝数　$w_{1人}=\frac{1}{2}N_{人}=11$

△部分每线圈匝数　$w_{1△}=\frac{1}{2}N_{△}=19$

正弦绕组为△连接：

人部分每线圈匝数　$w_{1人}=\frac{1}{2}N_{人}=23$

△部分每线圈匝数　$w_{1△}=\frac{1}{2}N_{△}=40$

2）导线线规

由于原三相绕组为△连接，导线线规为 1－ϕ1.45mm，其截面积为 $A_{c}=1.651\text{mm}^2$，根据正弦绕组简易计算公式可得

正弦绕组为△连接：

人部分导线截面积　$A_{人}=\frac{1}{0.94}\times\sqrt{3}A_{c}=3.042\ (\text{mm}^2)$

选用线规　2－ϕ1.40mm

△部分导线截面积　$A_{△}=\frac{1}{0.94}A_{c}=1.756\ (\text{mm}^2)$

选用线规　1－ϕ1.50mm

正弦绕组为△连接：

人部分导线 截面积　$A_{人}=\frac{1}{0.94}\times\frac{\sqrt{3}}{2}A_c=1.521$（mm²）

选用线规　1－ϕ1.40mm

△部分导线截面积　$A_{\triangle}=\frac{1}{0.94}\times\frac{1}{2}A_c=0.878$（mm²）

选用线规　1－ϕ1.04mm

式中，$\frac{1}{0.94}$也是考虑正弦绕组的绕组系数比三相绕组提高约6%的修正系数。

3）线圈节距

$$y=\frac{11}{12}\tau\approx 8$$

式中，$\tau=\frac{Z_1}{2p}=\frac{36}{4}=9$。

五、三相绕组改成正弦绕组实例

在感应电动机修理中，将原三相绕组改成正弦绕组，需要有原三相绕组的有关数据，方能按照正弦绕组构成原则进行正弦绕组排列，再由简易计算公式求得正弦绕组数据。

（一）有铭牌电机三相绕组改成正弦绕组

对有铭牌电机，只需根据铭牌上电机型号，便可在感应电动机技术数据表中查出所需数据。如果待修电机绕组没有拆掉，也可通过实测求取所需数据。现举例说明有铭牌电机将三相绕组改成正弦绕组的方法步骤。

例1：试将一台JO2-82-4三相感应电动机的三相绕组改制成正弦绕组。

根据三相感应电动机型号查三相感应电动机铁心和绕组数据表，可得JO2-82-4原三相绕组的数据为

定子槽数　$Z_1 = 48$

每槽导体数　$N_s = 2 \times$每个线圈匝数 $= 2 \times 11 = 22$

导线线规　3 - ϕ 1.40mm 高强度聚酯漆包圆铜线

绕组型式　双层叠绕

接法　△

并联支路　$a = 2$

现将三相绕组改成正弦绕组

（1）根据电机原理画出槽电势星形图，并确定绕组的排列

由$Z_1 = 48$、$2p = 4$算出每槽电角度 $\alpha = \dfrac{2p \times 180^\circ}{Z_1} = 15^\circ$，作出槽电势星形图。

正弦绕组的排列是分别按△与人部分的每极每相槽数 $q_\triangle = q_人 = \dfrac{q}{2} = 2$（其中 $q = \dfrac{Z_1}{6p} = 4$ = 偶数）进行的。其槽电势星形图和正弦绕组排列参看图3-15。

（2）根据槽电势星形图及正弦绕组排列画出绕组平面展开图和接线图（图5-1、5-2和5-3）。

（3）将正弦绕组三角形部分与星形部分混合接成延边三角形（△）或星形-三角形（⏢）（图5-4）。

（4）每槽导体数和每线圈匝数

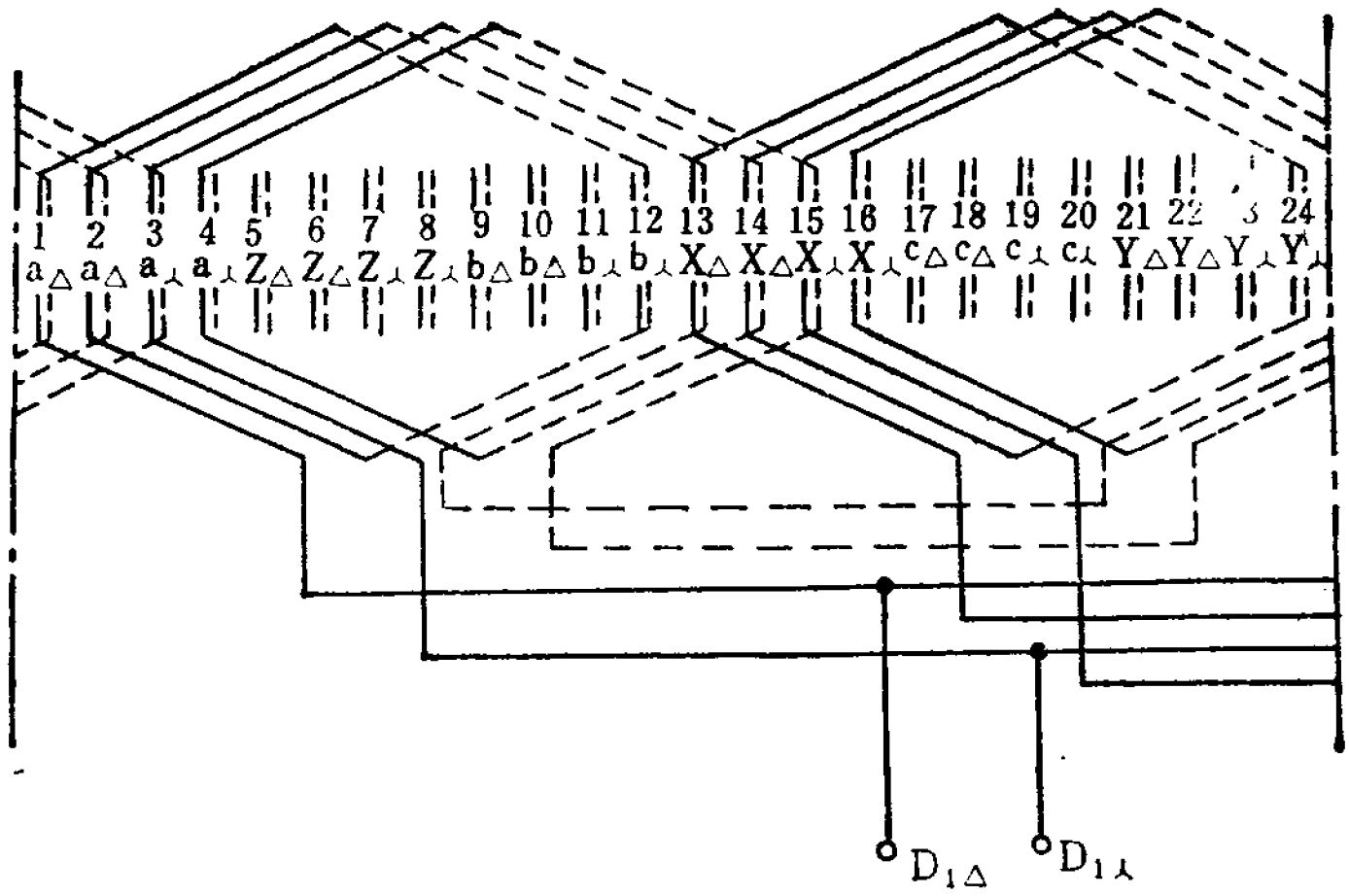
由于原三相绕组为△连接，每槽导体数 $N_s = 22$，根据正弦绕组简易计算公式可得

正弦绕组为△连接：

人部分每槽导体数　$N_人 = 0.94 \times \dfrac{1}{\sqrt{3}} N_s = 0.94 \times \dfrac{1}{\sqrt{3}} \times 22$

$= 11.94$

取　$N_人 = 14$



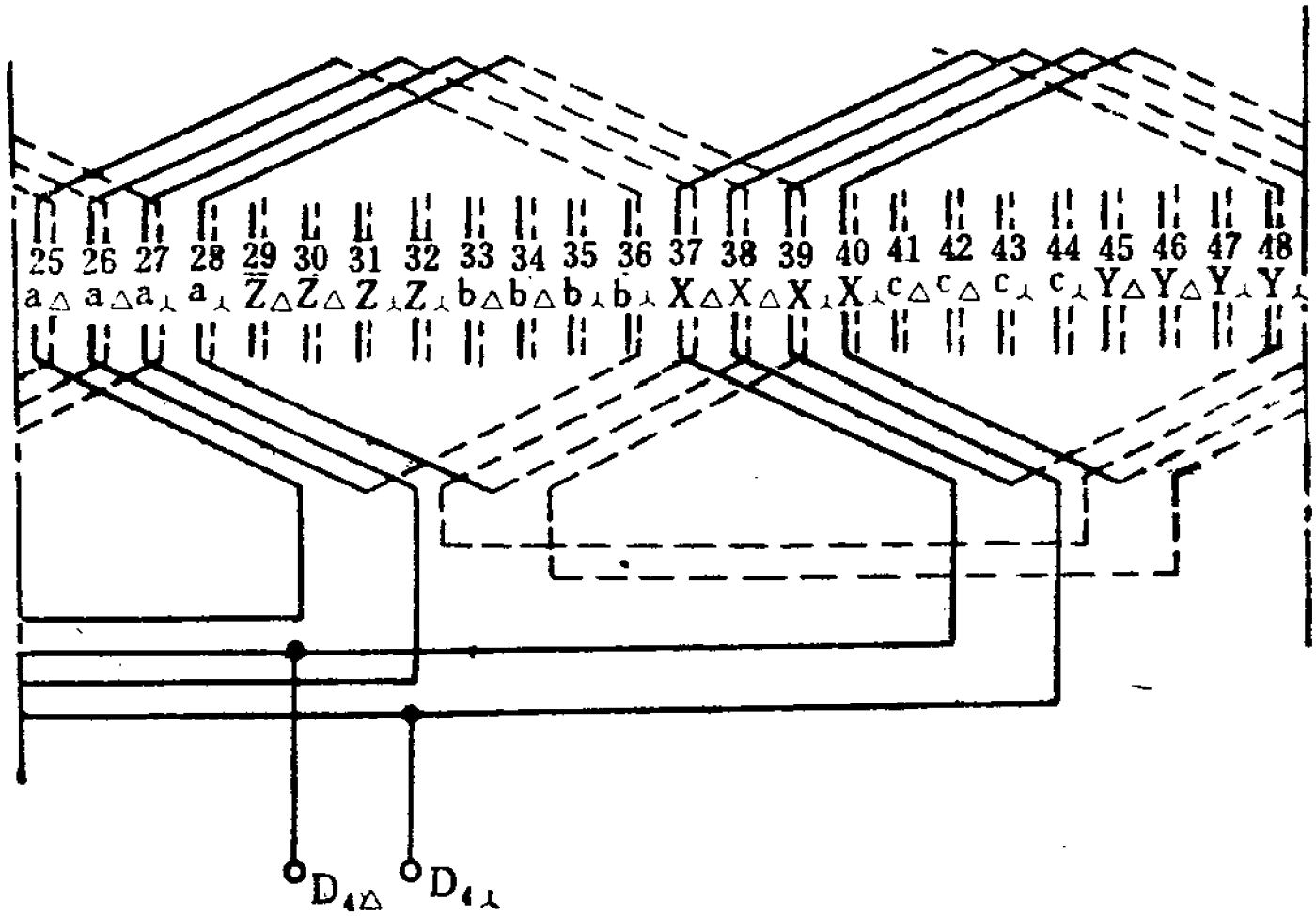


图5-1　$Z_1 = 48$、$2p = 4$ 正弦绕组中△与⅄部分 a 相绕组平面展开图

$(a_{\triangle} = a_{\curlywedge} = 2)$

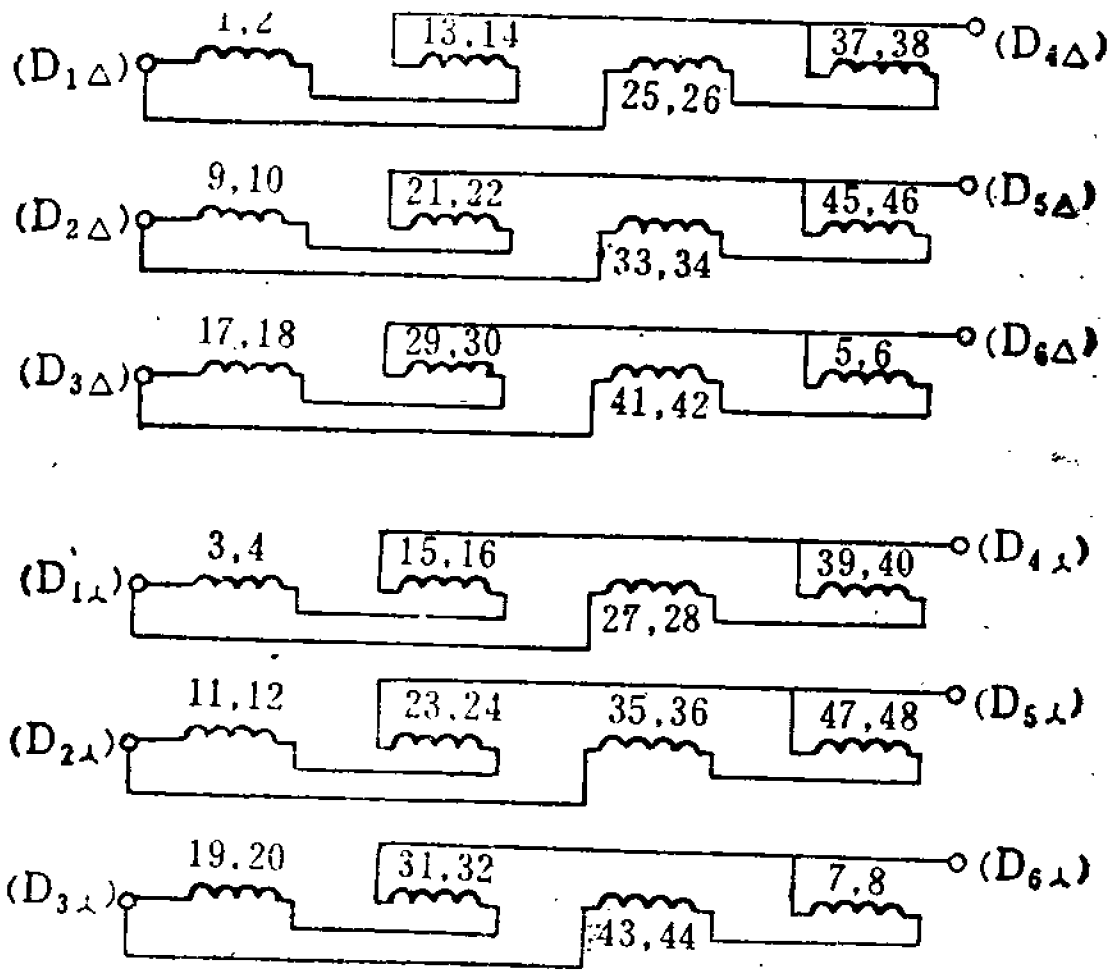


图5-2　$Z_1 = 48$、$2p = 4$ 正弦绕组简图

($a_{\triangle} = a_{人} = 2$)

△部分每槽导体数　$N_{\triangle} = 0.94N_s = 20.68$

取　$N_{\triangle} = 24$

正弦绕组为△连接：

人部分每槽导体数　$N_{人} = 0.94 \times \frac{2}{\sqrt{3}} N_s = 23.88$

取　$N_{人} = 24$

△部分每槽导体数　$N_{\triangle} = 0.94 \times 2N_s = 41.36$

取　$N_{\triangle} = 42$

因为双层绕组每线圈匝数为每槽导体数的一半，即

正弦绕组为△连接：

人部分每线圈匝数　$w_{1人} = \frac{1}{2} N_{人} = 7$

△部分每线圈匝数　$w_{1\triangle} = \frac{1}{2} N_{\triangle} = 12$

正弦绕组为△连接：

人部分每线圈匝数　$w_{1人} = \frac{1}{2} N_{人} = 12$

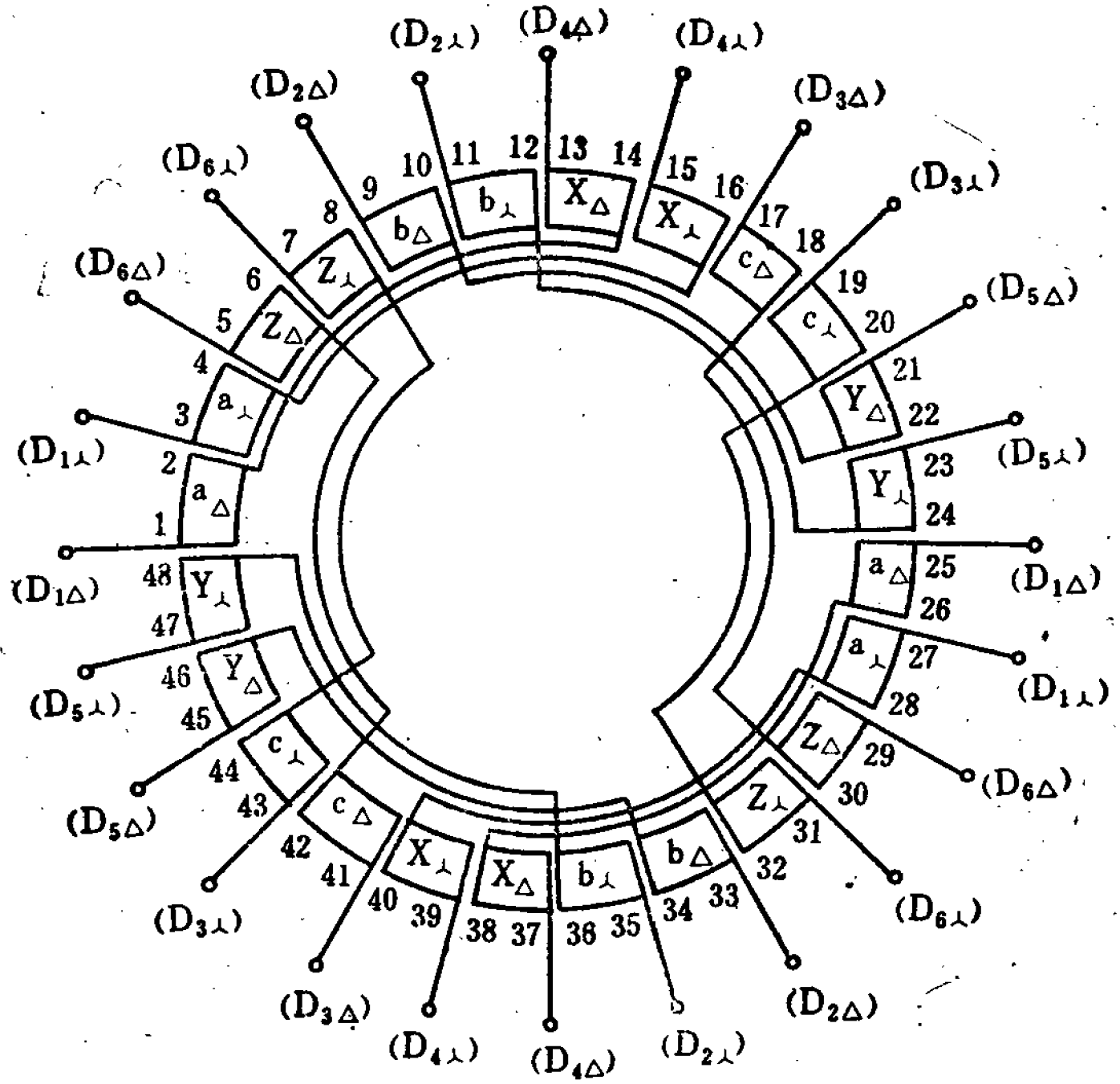


图5-3　$Z_1 = 48$、$2p = 4$ 正弦绕组接线草图

（$a_\triangle = a_人 = 2$）

△部分每线圈匝数　$w_{1\triangle} = \frac{1}{2} N_\triangle = 21$

（5）导线线规

由于原三相绕组为△连接，导线线规为 3－ϕ1.40mm，其截面积为 $A_o = 4.617\,mm^2$，根据正弦绕组简易计算公式可得

正弦绕组为△连接：

人部分导线截面积　$A_人 = \frac{1}{0.94} \times \sqrt{3}\, A_o = 8.507\ (mm^2)$

选用线规　2－ϕ1.56mm

2－ϕ1.68mm

△部分导线截面积　$A_{\triangle}=\frac{1}{0.94}A_c=4.912$（mm²）

选用线规　3－ϕ1.40mm

正弦绕组为△连接：

人部分导线截面积

$$A_{人}=\frac{1}{0.94}\times\frac{\sqrt{3}}{2}A_c$$

$=4.254$（mm²）

选用线规 4－ϕ1.16mm

△部分导线截面积

$$A_{\triangle}=\frac{1}{0.94}\times\frac{1}{2}A_c$$

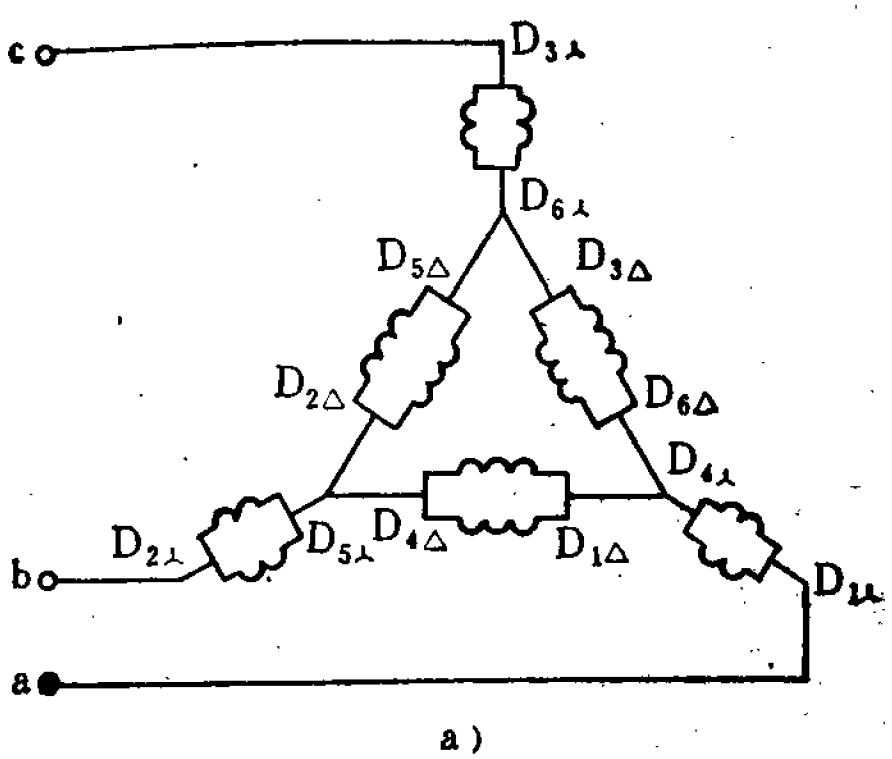
$=2.456$（mm²）

选用线规 2－ϕ1.25mm

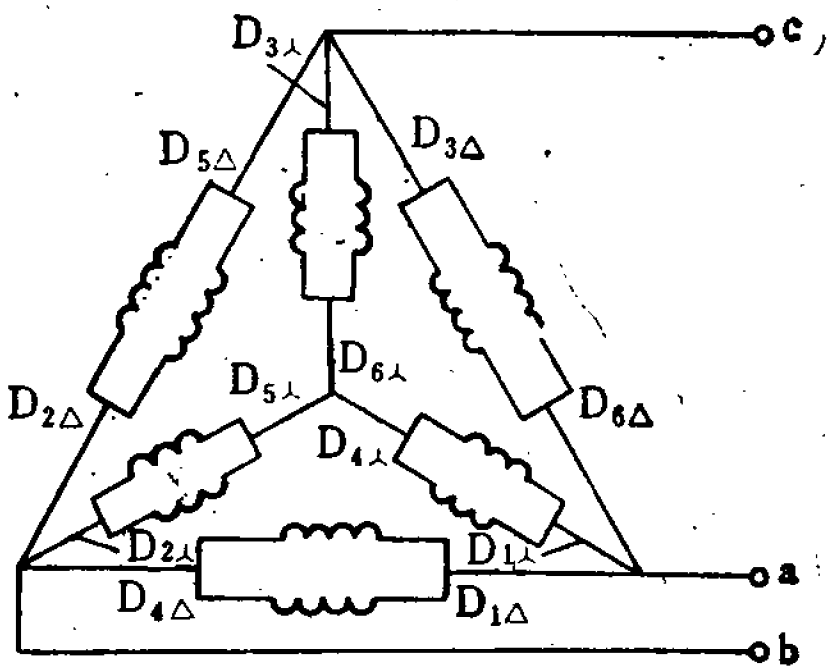
（6）线圈节距

$$y=\frac{11}{12}\tau=11$$

式中，$\tau=\frac{Z_1}{2p}=\frac{48}{4}=12$。



a）



b）

图5-4　正弦绕组连接图

a）△连接　b）△连接

例2：试将一台 JO2-81-6三相感应电动机的三相绕组改制成正弦绕组。

根据三相感应电动机型号查三相感应电动机铁心和绕组数据表，可得 JO2-81-6 原三相绕组的数据为

定子槽数　　$Z_1=72$

每槽导体数　$N_s=2\times$每个线圈匝数$=2\times16=32$

导线线规　　$2-\phi1.25$mm 高强度聚酯漆包圆铜线

绕组型式　　双层叠绕

接法　　△

并联支路　　$a=3$

现将三相绕组改成正弦绕组

（1）根据电机原理画出槽电势星形图，并确定绕组的排列

由$Z_1=72$，$2p=6$算出每槽电角度 $\alpha=\dfrac{2p\times180^\circ}{Z_1}=15^\circ$，作出槽电势星形图。

正弦绕组的排列是分别按△与人部分的每极每相槽数 $q_\triangle=q_人=\dfrac{q}{2}=2$（其中$q=\dfrac{Z_1}{6p}=4=$偶数）进行的。其槽电势星形图和正弦绕组排列如图5-5所示。

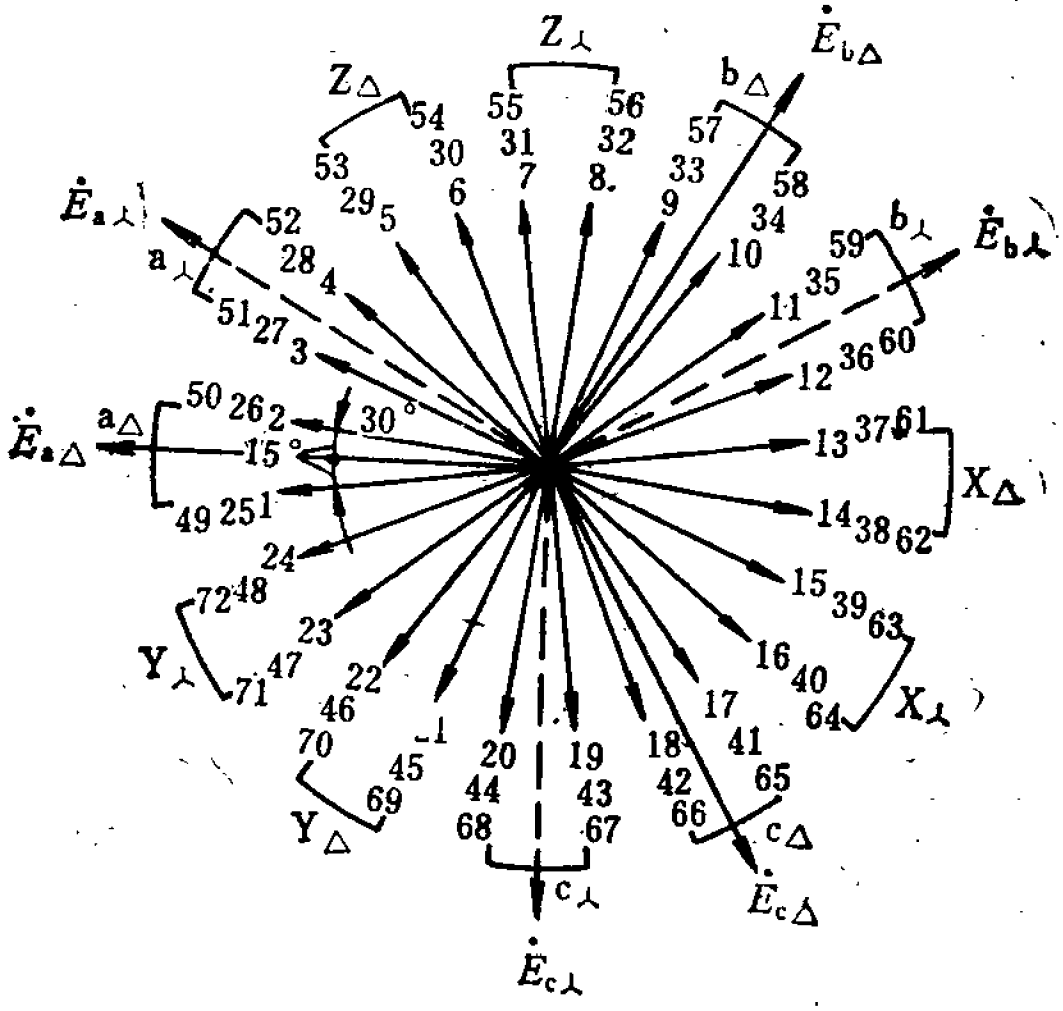
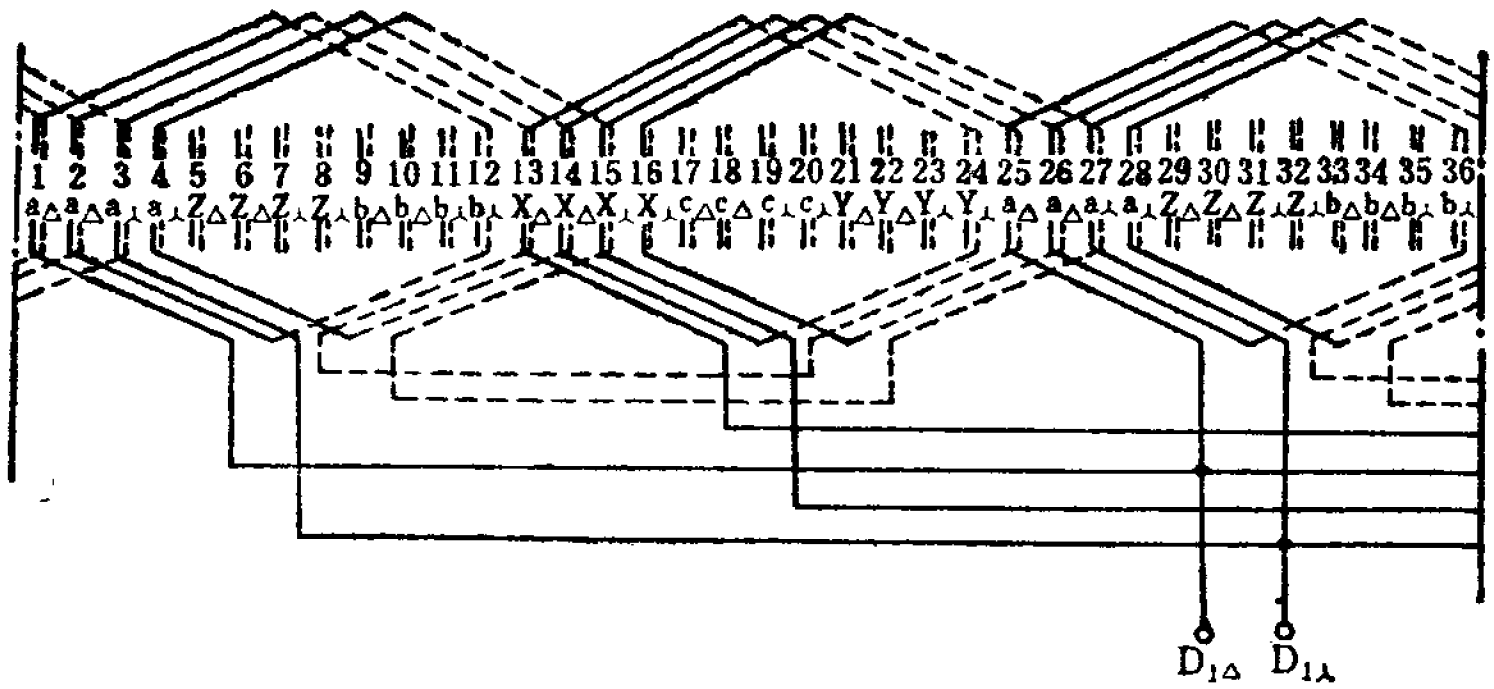


图5-5　$Z_1=72$、$2p=6$槽电势星形及正弦绕组的排列



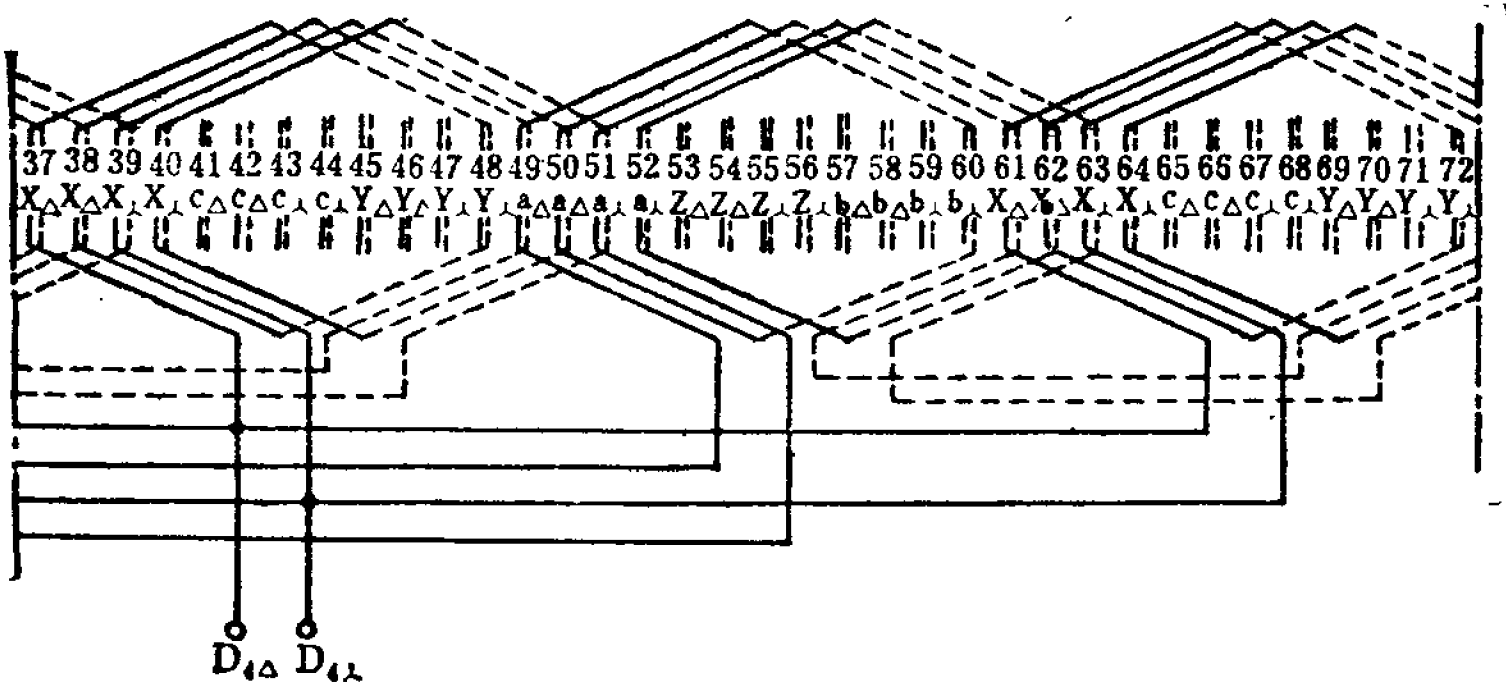


图5-6　$Z_1=72$、$2p=6$ 正弦绕组中△与人部分 a 相绕组平面展开图

（$a_{△}=a_{人}=3$）

（2）根据槽电势星形图及正弦绕组的排列，画出绕组平面展开图和接线图（图5-6、5-7和5-8）。

（3）将正弦绕组三角形部分与星形部分混合接成延边三角形△或星形-三角形⧋（图5-9）。

（4）每槽导体数和每线圈匝数

由于原三相绕组为△连接，每槽导体数 $N_s=32$，根据正弦绕组简易计算公式可得

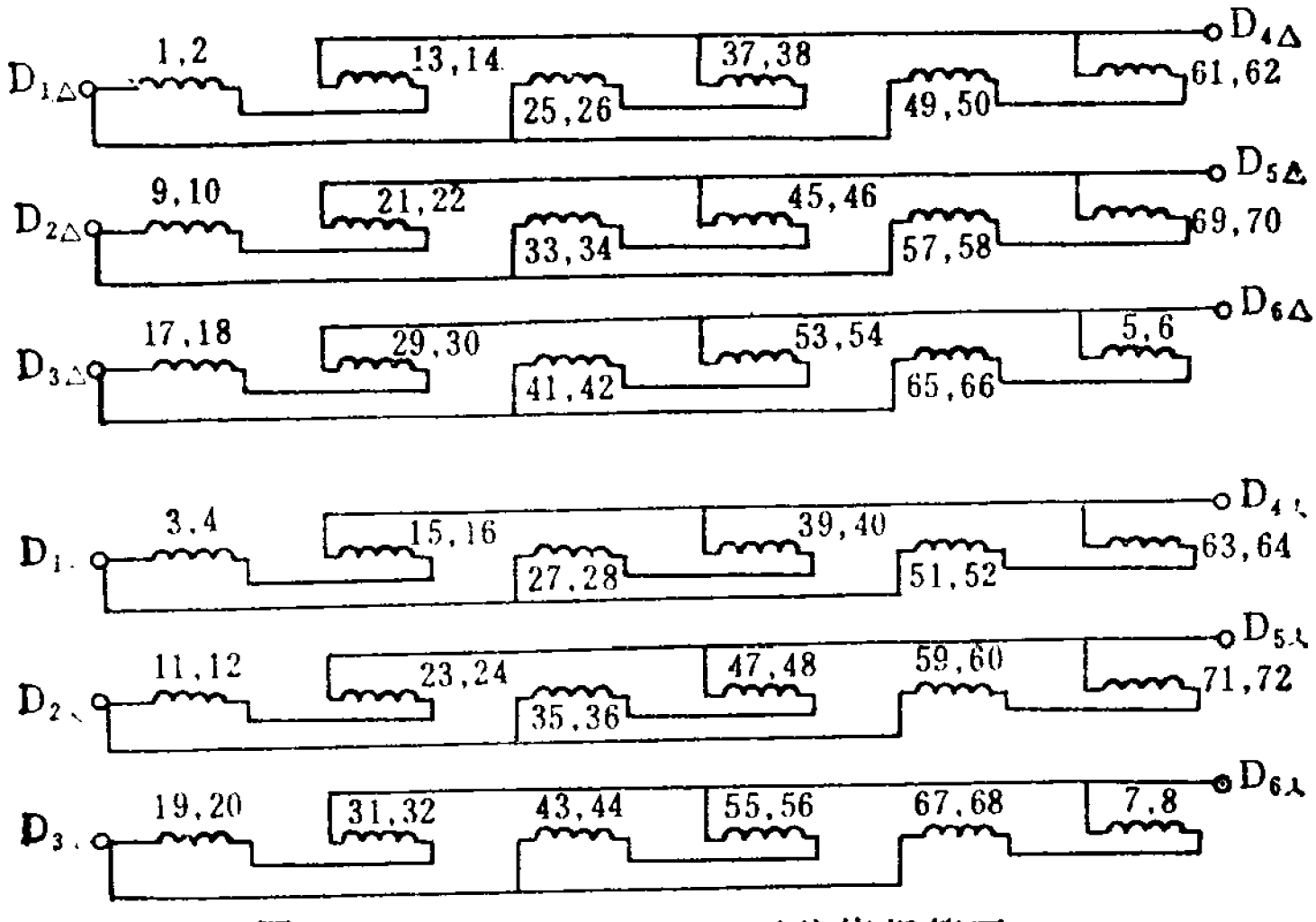


图5-7　$Z_1=72$、$2p=6$ 正弦绕组简图

($a_\triangle=a_人=3$)

正弦绕组为△连接：

人部分每槽导体数　$N_人=0.94\times\frac{1}{\sqrt{3}}N_s=0.94\times\frac{1}{\sqrt{3}}\times32=17.36$

取　$N_人=16$

△部分每槽导体数　$N_\triangle=0.94N_s=30.08$

取　$N_\triangle=28$

正弦绕组为人连接：

人部分每槽导体数　$N_人=0.94\times\frac{2}{\sqrt{3}}N_s=34.73$

取　$N_人=36$

△部分每槽导体数　$N_\triangle=0.94\times2N_s=60.16$

取　$N_\triangle=62$

因为双层绕组每线圈匝数为每槽导体数的一半，即

正弦绕组为△连接：

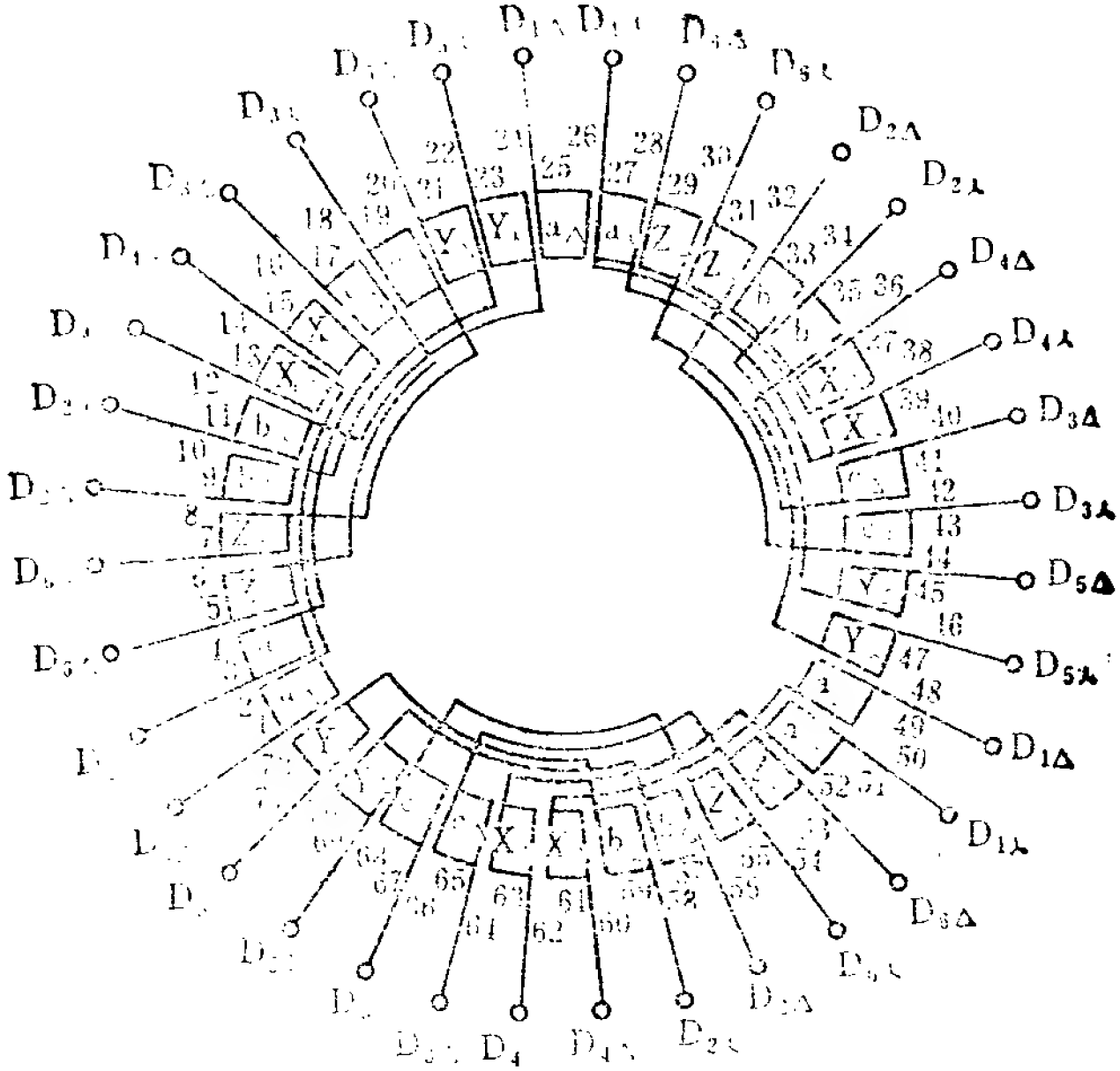
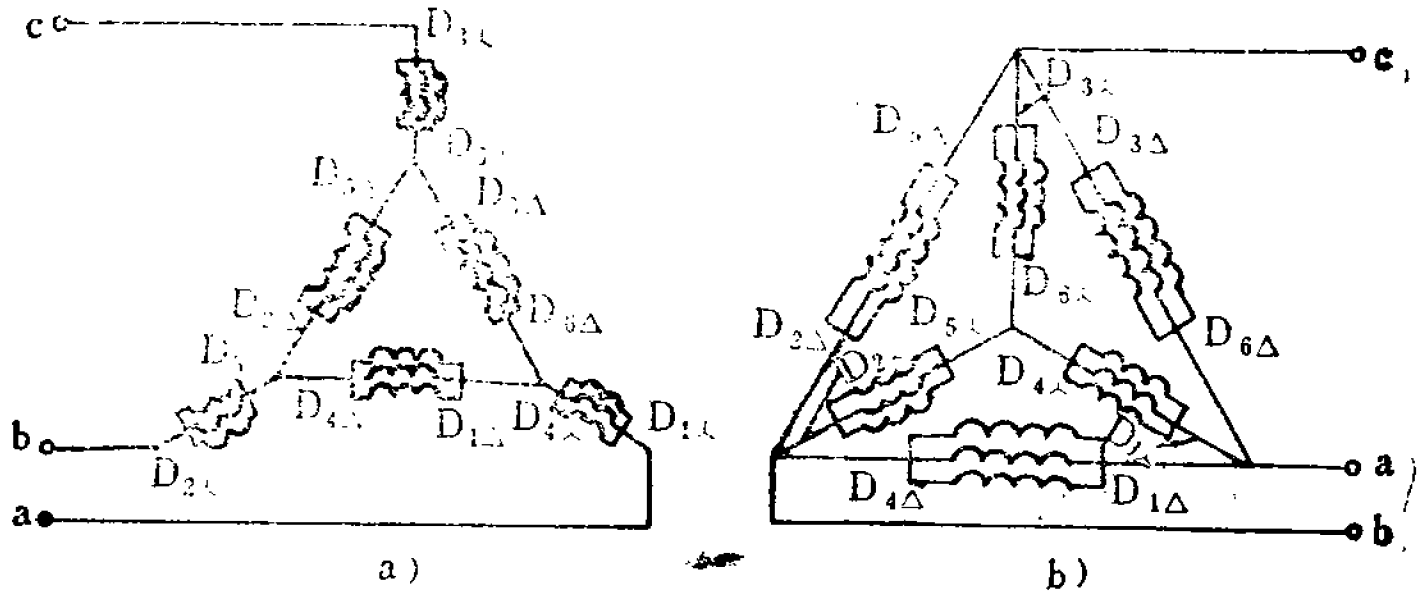


图5-8　$Z_1=72$、$2p=6$ 正弦绕组接线草图

（$a_\Delta=a_\curlywedge=3$）



a）　　b）

图5-9　$Z_1=72$、$2p=6$ 正弦绕组连接图

a）△连接　b）△连接

人部分每线圈匝数　$\omega_{1人}=\frac{1}{2}N_{人}=8$

△部分每线圈匝数　$\omega_{1\triangle}=\frac{1}{2}N_{\triangle}=14$

正弦绕组为△连接：

人部分每线圈匝数　$\omega_{1人}=\frac{1}{2}N_{人}=18$

△部分每线圈匝数　$\omega_{1\triangle}=\frac{1}{2}N_{\triangle}=31$

（5）导线线规

由于原三相绕组为△连接，导线线规为 $2-\phi 1.25mm$，其截面积为 $A_c=2.454mm^2$，根据正弦绕组简易计算公式可得

正弦绕组为△连接：

人部分导线截面积　$A_{人}=\frac{1}{0.94}\times\sqrt{3}A_c=4.522\ (mm^2)$

选用线规　$3-\phi 1.40mm$

△部分导线截面积　$A_{\triangle}=\frac{1}{0.94}A_c=2.61\ (mm^2)$

选用线规　$2-\phi 1.30mm$

正弦绕组为△连接：

人部分导线截面积　$A_{人}=\frac{1}{0.94}\times\frac{\sqrt{3}}{2}A_c=2.26\ (mm^2)$

选用线规　$1-\phi 1.16mm$

$1-\phi 1.20mm$

△部分导线截面积　$A_{\triangle}=\frac{1}{0.94}\times\frac{1}{2}A_c=1.305\ (mm^2)$

选用线规　$1-\phi 1.25mm$

（6）线圈节距

$$y=\frac{11}{12}\tau=11$$

式中，$\tau = \frac{Z_1}{2p} = \frac{72}{6} = 12$。

（二）无铭牌电机三相绕组改成正弦绕组

在修理旧电机中，有时既没有原绕组，也没有铭牌，这样，若要将原三相绕组改成正弦绕组，必须先根据电机铁心的有关尺寸，将原三相绕组的数据计算出来，然后，再按照有铭牌电机三相绕组改成正弦绕组的方法步骤来进行正弦绕组排列和计算正弦绕组的数据。

1．无铭牌电机三相绕组计算

（1）定子绕组每相匝数计算

由电势公式

$$E = 4.44 f w_1 K_{dp} \phi 10^{-8} = K_E U_\varphi$$

可得每相串联匝数

$$w_1 = \frac{K_E U_\varphi 10^8}{4.44 f K_{dp} \phi}$$

由于我国电网标准频率 $f = 50\text{Hz}$，故

$$w_1 = \frac{K_E U_\varphi 10^6}{2.22 K_{dp} \phi}$$

考虑到每极磁通 $\phi = B_p \tau l = \frac{2}{\pi} B_\delta \tau l$ 和极距 $\tau = \frac{\pi D_i}{2p}$，因此，每相串联匝数为

$$w_1 = \frac{p K_E U_\varphi 10^6}{2.22 K_{dp} B_\delta D_i l}$$

式中

1）极对数 p 可按经验公式估算

$$p = 0.28 \frac{D_i}{h_e}$$

其中 D_i——定子铁心内径(cm)；

h_c——定子轭高(cm)；

$$h_c = \frac{D_0 - D_i}{2} - h_s$$

D_0——定子铁心外径(cm)；

h_s——定子齿高(cm)。

根据计算结果，并参考电机的槽数，选取相近的整数。一般槽数少的，则极数宜少；槽数多的，极数可多些。

2）压降系数K_E

每相电势E的大小等于外加电源相电压减去绕组的阻抗压降。通常用$E = K_E U_\varphi$表示。K_E为压降系数，其值由表5-1可查得。

表5-1　压降系数

电动机容量P	小型	中型	大型
压降系数K_E	0.86	0.90	0.91

3）外加电源相电压为U_φ(V)

4）绕组系数K_{dp}

绕组系数K_{dp}综合考虑了由于绕组的分布和短距对电势的影响。

$$K_{dp} = K_d \cdot K_p$$

其中　K_d——分布系数，其值由表5-2可查得；

K_p——短距系数，其值由表5-3可查得。

表5-2　分布系数K_d

每极每相槽数q	1	2	3	4	5	6	7以上
分布系数K_d	1.0	0.966	0.96	0.958	0.957	0.956	0.956

5）气隙磁通密度B_δ(Gs)

表5-3 短距系数K_p

线圈跨距 y	每极槽数												
	24	18	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6
1-25	1.000												
1-24	0.998												
1-23	0.991												
1-22	0.981												
1-21	0.966												
1-20	0.947												
1-19	0.924	1.000											
1-18	0.897	0.996											
1-17	0.866	0.985	1.000										
1-16	0.832	0.966	0.995	1.000									
1-15	0.793	0.940	0.981	0.995	1.000								
1-14	0.752	0.906	0.956	0.978	0.994	1.000							
1-13	0.707	0.866	0.924	0.951	0.975	0.993	1.000						
1-12		0.819	0.882	0.914	0.944	0.971	0.991	1.000					
1-11		0.766	0.831	0.866	0.901	0.935	0.966	0.990	1.000				
1-10		0.707	0.773	0.809	0.847	0.884	0.924	0.960	0.988	1.000			
1-9			0.707	0.743	0.782	0.833	0.866	0.919	0.951	0.985	1.000		
1-8				0.669	0.707	0.749	0.793	0.841	0.891	0.940	0.981	1.000	
1-7						0.663	0.707	0.756	0.809	0.866	0.924	0.975	1.000
1-6								0.655	0.707	0.766	0.832	0.901	0.966
1-5										0.643	0.703	0.782	0.866
1-4												0.624	0.707

表5-4　三相感应电动机的气隙磁密（Gs）

电机型式 \ 极对数 P	1	2	3	4
开启式	6300～7500	7000～8000	7000～8000	7000～8000
封闭式	5000～6500	6000～7500	6000～7500	6400～7400

注：1 Gs = 10^{-4} T

气隙磁通密度B_δ的选取是否恰当，对电动机的性能影响很大，其值可参考表5-4。

电机容量较大的取较大值，容量较小的取较小值。1kW以下的电动机则比表列数值更低，一般约为4000～6000Gs。

选取气隙磁密时，还须考虑气隙尺寸的大小。在修理的旧电机中，往往遇到气隙过大的情况，此时，必须适当地降低磁通密度，以保证电动机的空载电流不致过大和功率因数不致过低。

6）定子铁心内径为D_i(cm)。

7）定子铁心有效长度为 l（cm）。

设每相并联支路数为 a，则每相绕组匝数

$$w = aw_1$$

并联支路数 a 的选择，根据导线规格和工艺要求来决定。一般小容量电动机采用一路串联（即 $a = 1$）。电机容量较大时，每相电流增大，所需导线截面积也增大。为了避免绕线时并绕根数过多，常采用多路并联。例如在4极电机中，可采用两路或四路并联（即 $a = 2$ 或 $a = 4$）；在6极电机中，可采用两路、三路或六路并联。并联支路数 a 一定是极数$2P$的公约数。

（2）每槽导体数的确定

由于每相匝数 $w = aw_1$，而一匝由两根导体组成，所以每相导体数为$2aw_1$，三相总导体数则为 $3 \times 2aw_1 = 6aw_1$。如定子铁心

槽数为Z_1，则每槽导体数为

$$N_s=\frac{6aw_1}{Z_1}$$

式中　a——并联支路数；

w_1——每相串联匝数。

N_s的数值必须是整数。如计算出的数值不是整数时，应选取相近的整数。若是双层绕组，N_s的数值还应是偶数，否则无法分为上下两层。

在双层绕组中，每一槽中有上下两个线圈边，因此，每个线圈的匝数w_y为

$$w_y=\frac{N_s}{2}$$

而绕组线圈总数等于Z_1，因此，每相线圈数为$\frac{Z_1}{3}$。

在单层绕组中，每一槽内只有一个线圈边，因此，每个线圈的匝数w_y为

$$w_y=N_s$$

而绕组线圈总数为$\frac{Z_1}{2}$，因此，每相线圈数为$\frac{Z_1}{6}$。

（3）导线截面积的计算

对无铭牌电机，导线截面积可根据定子铁心槽形来计算。

导线绝缘后的外径

$$d_0=\sqrt{\frac{A\cdot s_f}{N_s\cdot N}}\quad(\mathrm{mm})$$

式中

1）A——槽有效面积(mm^2)

$$A=A_s-A_i$$

其中　A_s——槽楔下的槽面积。对于梨形槽（图5-10a）和梯形

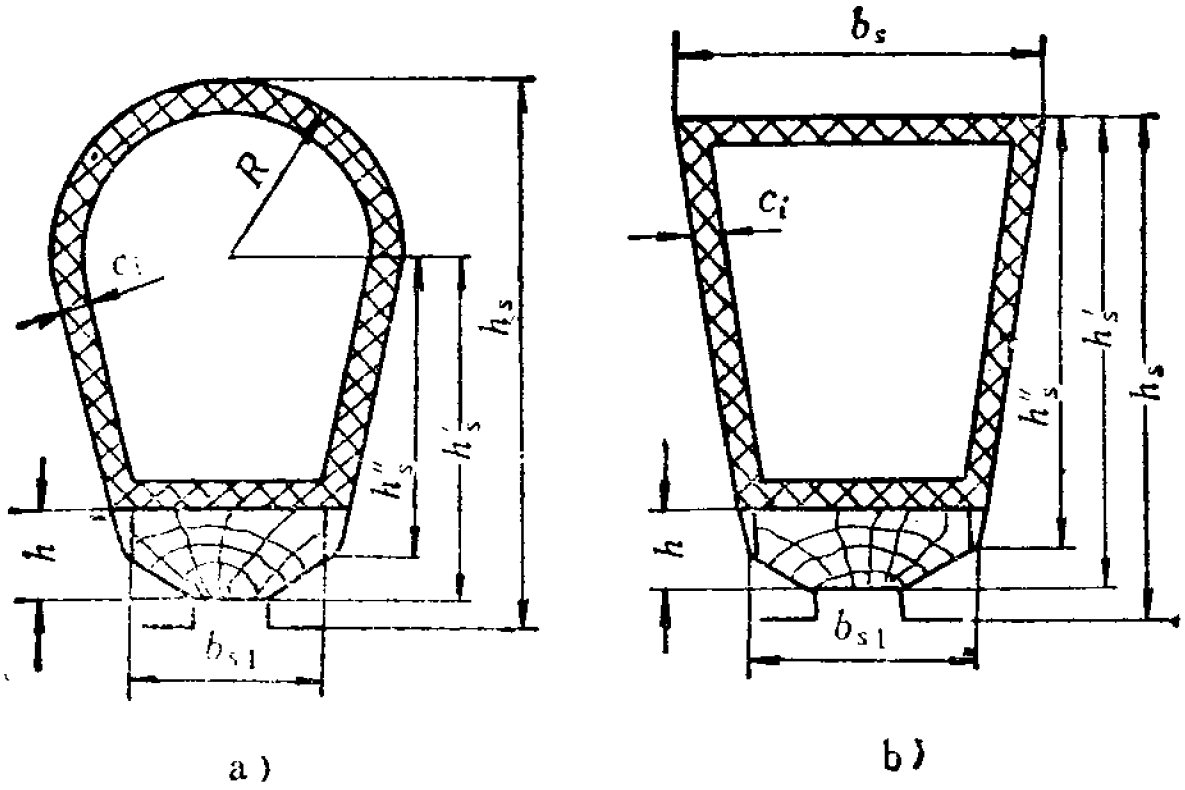


图5-10　槽形尺寸

a）梨形槽　b）梯形槽

h—槽楔厚度　c_i—绝缘厚度

A_i—槽绝缘所占面积

槽（图5-10 b）计算公式如下

梨形槽：
$$A_s = \frac{2R + b_{s1}}{2}(h_s' - h) + \frac{\pi R^2}{2} \quad (mm^2)$$

梯形槽：
$$A_s = \frac{b_s + b_{s1}}{2}(h_s' - h) \quad (mm^2)$$

单层绕组槽绝缘所占面积

梨形槽：$A_i = c_i(2h_s' + \pi R)(mm^2)$

梯形槽：$A_i = c_i(2h_s' + b_s)(mm^2)$

双层绕组槽绝缘所占面积

梨形槽：$A_i = c_i(2h_s' + \pi R + 2R + b_{s1})(mm^2)$

梯形槽：$A_i = c_i(2h_s' + 2b_s + b_{s1})(mm^2)$

其中　c_i——槽绝缘材料厚度(mm)。

2）s_f——槽满率，可取0.75～0.78。

槽满率是表示导线在槽内填充程度的一个重要参数。槽满率过高将会引起嵌线困难，从而影响嵌线时绝缘容易受损，可能造成绝缘击穿或绕组短路等故障。槽满率过低，槽的利用率差，将降低电机容量。

3）N_s——每槽导体数。

4）N——导体并绕根数。

根据计算的d_0及绝缘导线品种（漆包线或单丝漆包线），由表5-5查得绝缘厚度（双边厚度），再由附录查得导线的直径d及每根导线的截面积S_1。

（4）估算电机的额定功率P。

每相电流　　$I_\varphi = S_1 N a j$　（A）

表5-5　各种圆电磁线绝缘厚度（双边厚度）

导线名称 \ 导线直径 / 绝缘厚度	0.51～0.69	0.72～0.96	1.0～1.62	≥1.68
氧化膜铝线	0.02	0.02	0.02	0.02
高强度漆包线（聚酯、缩醛、彩色聚酯、彩色聚氨酯）	0.03 0.05	0.04 0.06	0.06 0.08	0.07 0.09
单玻璃丝漆包线（聚酯、缩醛）	0.20	0.22	0.22	0.24
双玻璃丝包线（硅有机、醇酸）	0.25	0.25	0.27	0.28
聚酰胺-亚胺高强度漆包线	0.03	0.04	0.06	0.07
耐冷冻剂漆包线	0.05	0.06	0.08	0.09

式中　j——电流密度（A/mm²），可由表5-6查得。

表中数据较适用系列产品，对早年及非系列产品应酌情减低

表5-6　中小型感应电动机定子电流密度（j）（A/mm²）

极数	2	4	6	8
封闭式	4.0～4.5	4.5～5.5		4.0～5.0
开启式	5. ～6.0	5.5～6.5		5.0～6.0

10～15%，一般功率小者取大值，功率大者取小值。

估算电动机的额定功率

$$P_e = 3U_\varphi I_\varphi \cos\varphi\eta \times 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

式中　U_φ——电动机的相电压(V)；

I_φ——电动机的相电流(A)；

$\cos\varphi$——功率因数；

η——效率。

功率因数$\cos\varphi$和效率η可参考同类型电动机选取。

估算出来的功率P_e当然不可能很准确，须待电动机修好后，在负载时根据温升及性能情况决定其额定功率。

例3：有一台防护式感应电动机，铭牌及绕组数据均已遗失。实测电机定子铁心的外径D_0为368mm，内径D_i为230mm，定子槽数Z_1为36，铁心长l为105mm，定子齿高h_s约为30mm。检查电机铁心装压紧密，质量较好。若绕组采用Δ接法，试求(1)每槽导体数；(2)确定其导线规格和电机容量；(3)将三相绕组改成正弦绕组。

(1) 每槽导体数

由于铭牌已遗失，首先要确定电动机极数，可按下列经验公式估算

$$p = 0.28\frac{D_1}{h_s} = 0.28 \times \frac{23}{3.9} \approx 1.65$$

式中，$h_c=\frac{D_0-D_i}{2}-h_s=\frac{36.8-23}{2}-3.0=3.9$（cm）

电动机的极对数不可能为小数，根据定子槽数，选取 $P=2$，即重绕为四极电机。

1）极距 $\tau=\frac{\pi D_i}{2P}=\frac{3.14\times23}{4}=18(cm)$

2）选取气隙磁密B_δ，因为铁心质量较好，且为防护式，由表5-4取$B_\delta=7500Gs$

3）计算每极磁通 ϕ

$\phi=0.637B_\delta\tau l=0.637\times7500\times18\times10.5=9.05\times10^5$（Mx）

（$1Mx=10^{-8}Wb$）

4）求绕组系数K_{dp}

由于 $q=\frac{Z_1}{2pm}=\frac{36}{4\times3}=3$ 查表5-2得$K_d=0.96$；采用双层短距绕组，$\tau=\frac{Z_1}{2P}=\frac{36}{4}=9$，$y=\frac{5}{6}\tau=\frac{5}{6}\times9=7.5$，取 $y=7$，即跨距1-8，查表5-3得 $K_p=0.94$，所以，绕组系数为

$$K_{dp}=K_d\cdot K_p=0.96\times0.94=0.90$$

5）选取压降系数 K_E

由于电机铁心较小，容量不大，由表5-1取$K_E=0.86$。

6）计算每相串联匝数w_1

绕组采用△形接法，额定电压为 380 V，因此得相电压$U_\varphi=\frac{380}{\sqrt{3}}=220$ V。

$$w_1=\frac{K_EU_\varphi10^6}{2.22K_{dp}\phi}=\frac{0.86\times220\times10^6}{2.22\times0.9\times9.05\times10^5}=104\ （匝）$$

若采用两路并联，即 $a=2$，则每相绕组总匝数为

$$w=aw_1=2\times104=208\ （匝）$$

7）求每槽导体数N_s。

$$N_s=\frac{6aw_1}{Z_1}=\frac{6\times 2\times 104}{36}=34.67$$

取$N_s=34$（偶数）

8）每相线圈个数为$\frac{Z_1}{3}=\frac{36}{3}=12$(个)

9）每个线圈匝数w_y

$$w_y=\frac{N_s}{2}=\frac{34}{2}=17 \quad (匝)$$

（2）确定导线规格和电机容量

1）计算槽有效面积

用白纸印出铁心槽形尺寸如图5-11。取槽楔厚度$h=3$，槽绝缘厚度$c_i=0.52$。

$$A_s=\frac{b_s+b_{s1}}{2}(h'_s-h)=\frac{15+10}{2}\times(29-3)$$

$=325$ (mm^2)

$$A_i=c_i(2h'_s+2b_s+b_{s1})$$

$=0.52\times(2\times29+2\times15+10)$

$=51$ $(mm)^2$

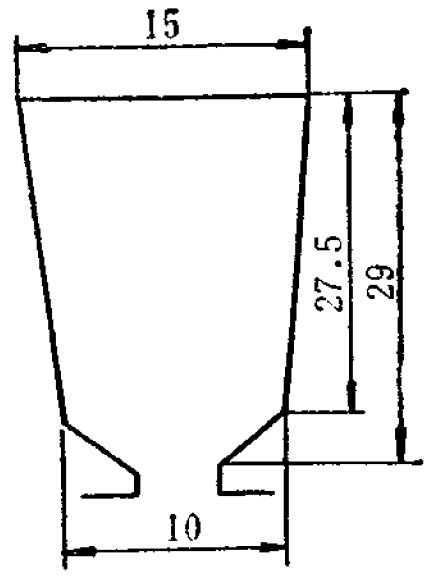


图5-11 电动机槽形

槽有效面积 $A=A_s-A_i=325-51=274$ (mm^2)

2）确定导线尺寸

本台电动机为内径较大的4极双层绕组，嵌线较方便，但由于梯形槽中导线填充情况较梨形槽差，因此，选取槽满率$s_f=0.76$。又导线直径一般不宜大于$\phi 1.5$，通过试算取导线并绕根数$N=3$，因此，导线绝缘外径d_0为

$$d_0=\sqrt{\frac{A\cdot s_f}{N\cdot N_s}}=\sqrt{\frac{274\times 0.76}{3\times 34}}=1.44 \quad (mm)$$

导线采用QZ型高强度漆包铜线，由表5-5查得绝缘厚度为

0.08（双边厚度），因此选取 $\phi = 1.35$。由附录查得其截面积 $S_1 = 1.431(mm^2)$。

3）计算每相电流

根据该电动机具体情况，选取 $j = 4.5A/mm^2$，这样，每相电流

$$I_\varphi = S_1 N a j = 1.431 \times 3 \times 2 \times 4.5 = 38.5 \quad (A)$$

4）估算电动机的功率

由于三相绕组为人接法，则 $U_\varphi = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220(V)$；参考相近的电动机，取 $\eta = 0.89$，$\cos\varphi = 0.88$，估算电动机的额定功率

$$P_e = 3U_\varphi I_\varphi \cos\varphi \cdot \eta \times 10^{-3}$$

$$= 3 \times 220 \times 38.5 \times 0.88 \times 0.89 \times 10^{-3} = 20 \quad (kW)$$

（3）将三相绕组改成正弦绕组

通过无铭牌电机三相绕组计算，已得原三相绕组数据：

定子槽数　　$Z_1 = 36$

每槽导体数　$N_s = 34$

导线线规　　$3 - \phi 1.35mm$

绕组型式　　双层叠绕

接法　　人

并联支路　　$a = 2$

现将三相绕组改成正弦绕组

1）根据电机原理画出槽电势星形图，并确定绕组的排列

由 $Z_1 = 36$，$2p = 4$，算出每槽电角度 $\alpha = \frac{2p \times 180^\circ}{Z_1} = 20^\circ$，作出槽电势星形图。

正弦绕组的排列是分别按△与人部分的每极每相槽数 $q_\triangle = q_人 = \frac{q}{2} = \frac{3}{2}$（其中 $q = \frac{Z_1}{6p} = 3 =$ 奇数）进行的。当每极每相槽数 q

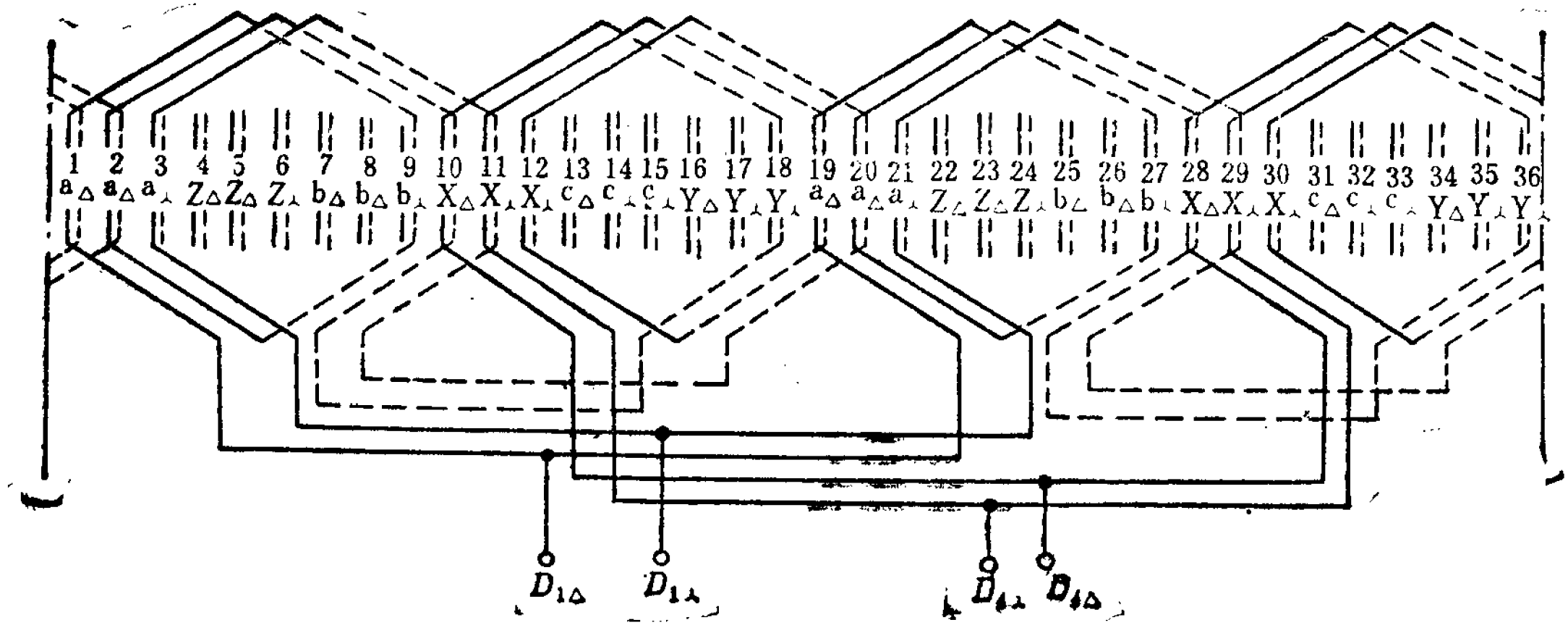


图5-12　$Z_1=36$、$2p=4$ 正弦绕组中△与人部分 a 相绕组平面展开图

($a_{\triangle}=a_{人}=2$)

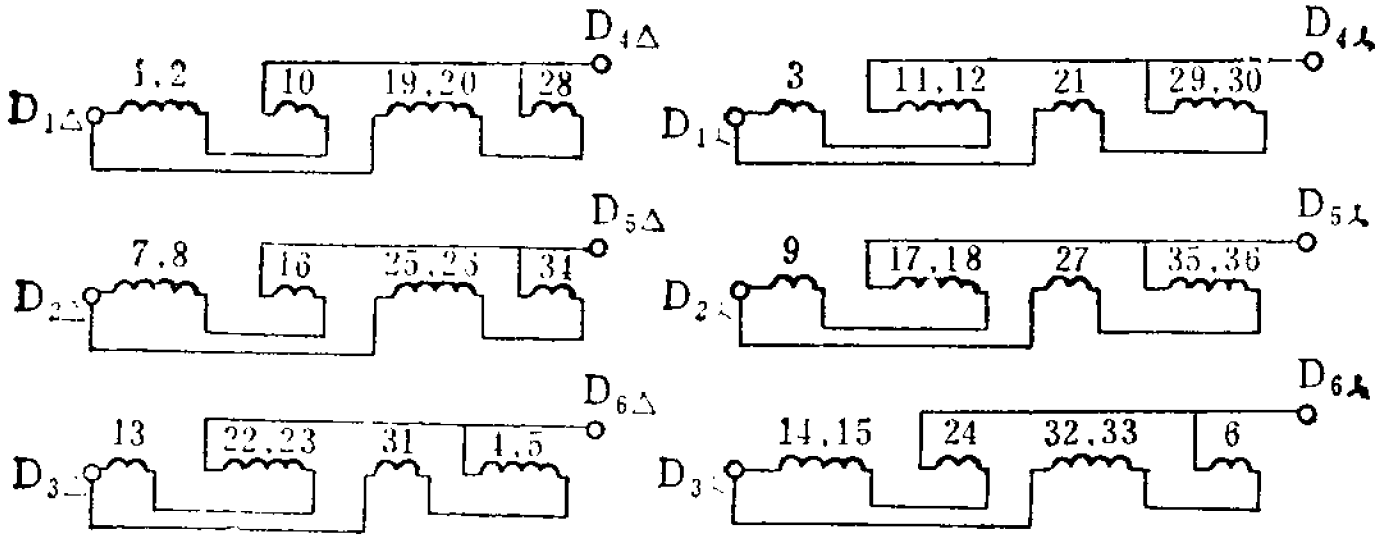


图5-13　$Z_1 = 36$、$2P = 4$ 正弦绕组简图

（$a_{\triangle} = a_{人} = 2$）

为奇数时，正弦绕组的排列有三种方案，本例采用轮换排列方案，其槽电势星形图和正弦绕组排列参看图3-20。

2）根据槽电势星形图及正弦绕组排列，画出绕组平面展开图和接线图（图5-12、5-13和5-14）。

3）将正弦绕组三角形部分与星形部分混合接成延边三角形（△）或星形-三角形（⏢）（参看图5-4）。

4）每槽导体数和每线圈匝数

由于原三相绕组为人连接，每槽导体数$N_s = 34$，根据正弦绕组简易计算公式可得

正弦绕组为△连接：

人部分每槽导体数　$N_{人} = 0.94N_s = 0.94 \times 34 = 31.96$

取　$N_{人} = 30$

△部分每槽导体数　$N_{\triangle} = 0.94 \times \sqrt{3} N_s = 55.35$

取　$N_{\triangle} = 52$

正弦绕组为⏢连接：

人部分每槽导体数　$N_{人} = 0.94 \times 2 N_s = 63.92$

取　$N_{人} = 62$

△部分每槽导体数　$N_{\triangle} = 0.94 \times 2\sqrt{3} N_s = 110.7$

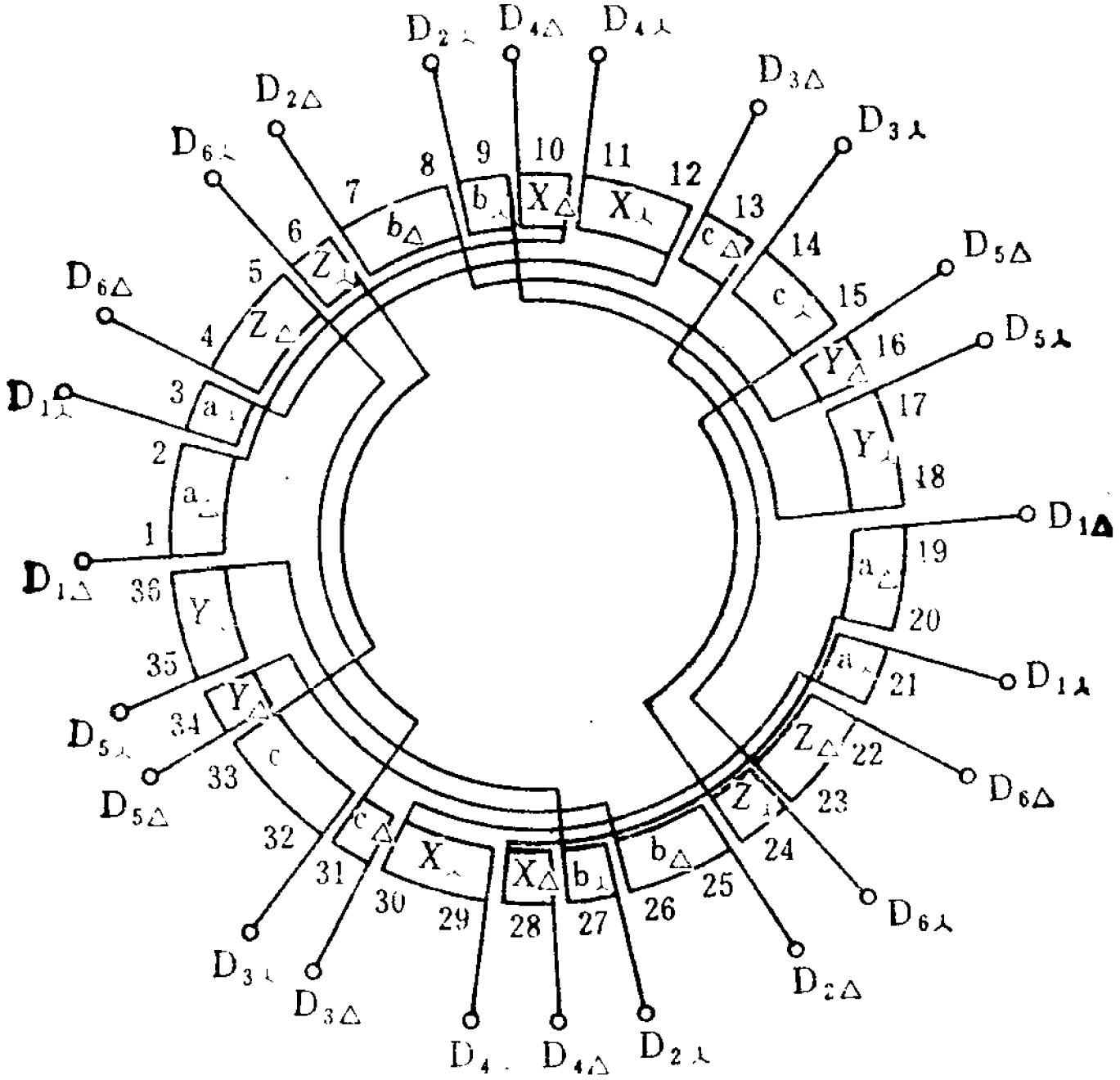


图5-14　$Z_1 = 36$、$2p = 4$ 正弦绕组接线草图

（$a_{\triangle} = a_{人} = 2$）

取　$N_{\triangle} = 108$

因为双层绕组每线圈匝数为每槽导体数的一半，即

正弦绕组为△连接：

人部分每线圈匝数　$w_{1人} = \frac{1}{2} N_{人} = 15$

△部分每线圈匝数　$w_{1\triangle} = \frac{1}{2} N_{\triangle} = 26$

正弦绕组为△连接：

人部分每线圈匝数　$w_{1人} = \frac{1}{2} N_{人} = 31$

△部分每线圈匝数　$w_{1\triangle}=\frac{1}{2}N_{\triangle}=54$

5）导线线规

由于原三相绕组为人连接，导线线规为 1-ϕ1.35mm，其截面积为$A_c=1.431mm^2$，根据正弦绕组简易计算公式可得

正弦绕组为△连接：

人部分导线截面积　$A_{人}=\frac{1}{0.94}A_c=\frac{1}{0.94}\times1.431=1.522(mm^2)$

选用线规　1-ϕ1.40mm

△部分导线截面积　$A_{\triangle}=\frac{1}{0.94}\times\frac{1}{\sqrt{3}}A_c=0.879(mm^2)$

选用线规　1-ϕ1.08mm

正弦绕组为△连接：

人部分导线截面积　$A_{人}=\frac{1}{0.94}\times\frac{1}{2}A_c=0.761\ (mm^2)$

选用线规　1-ϕ1.00mm

△部分导线截面积　$A_{\triangle}=\frac{1}{0.94}\times\frac{1}{2\sqrt{3}}A_c=0.439\ (mm^2)$

选用线规　1-ϕ0.74mm

6）线圈节距

$$y=\frac{11}{12}\tau\approx8$$

式中　$\tau=\frac{Z_1}{2p}=\frac{36}{4}=9$。

（三）改极电机三相绕组改成正弦绕组

在生产实践中，有时遇到感应电动机的转速与它所拖动的机器设备不相适应，可采用改变感应电动机极数的办法来改变电动机的转速，使之适应设备的需要。

改极电机三相绕组改成正弦绕组，可先将改极后的三相绕组的有关数据计算出来，然后，仍按照有铭牌电机三相绕组改成正弦绕组的方法步骤来进行正弦绕组排列和计算正弦绕组数据。

1．三相绕组改极计算

感应电动机的定子绕组和转子绕组的极数必须相同，否则，不能产生转动力矩。绕线式转子绕组的极数是固定的，如果定子绕组改变极数的话，那么，转子绕组也要同时重绕改极。而笼式转子绕组的极数随定子绕组极数的改变而自动改变，因此，一般只对笼式感应电动机进行改极变速。

感应电动机改变极数计算时，应注意事项分述于下。

（1）定转子槽配合问题

一台经过正规设计制造出来的合格电动机，一般定转子槽数都有良好的配合。这种配合是与极数有关的。因此，当电动机改变极数时，应重新考虑定转子槽数的配合是否适用于改变后的极数。如果配合不恰当，就会使电动机产生电磁噪声、振动、起动困难等毛病，严重时甚至根本无法起动或运行时损耗增大，使电机温升过高。

定转子槽配合是一个相当复杂的问题，通常根据理论分析和实践经验得出一些选择的原则和数据，这些原则主要是：

$$Z_1 - Z_2 \neq 0$$

$$Z_1 - Z_2 \neq 1$$

$$Z_1 - Z_2 \neq \pm 2p$$

$$Z_1 - Z_2 \neq \pm 1 \pm 2p$$

式中 Z_1——定子槽数；

Z_2——转子槽数；

p——极对数。

定转子槽配合的数据如表5-7，供计算时参考。

表5-7　笼式三相感应电动机定转子槽数的推荐值

极数 ($2p$)	定子槽数 (Z_1)	转子槽数(Z_2)(直槽)	转子槽数(Z_2)(斜槽)
2	18		16, 26
	24	〔16〕, 32	(18), *20, (30), 31, 33, 34, 35
	30	*22, 38	(18), 20, 21, 23,(24), 37,39, 40
	36	*28, 44, *46	25, 27, 29, 43, 45, 47
	42	32, 34, 50, 52	
	48	38, 40, 56, 58	37, 39, 41, 55, 57, 59
4	24	〔32〕	16,〔20〕, *22, 30, 33, 34, 35, 36
	36	*26, 44, 46	(24), 27, 28, 30, 〔32〕, 45, 48
	42	(34), (50), 52, 54	(33), 34, (38), (51), 53
	48	34, 38, 56, 58, 62, 64	(36), (39), 40, 〔44〕, 57, 59
	60	50, 52, 68, 70, 74	48, 49, 51, 56, 64, 69, 71
	72	62, 64, 80, 82, 86	61, 63, 68, 76, 81, 83
6	36	*26, 42, 〔48〕	*33, 47, 49, 50
	54	*44, 64, 66, 68	42, 43, 65, 67
	72	56,58,62,82,84, 86, 88	57, 59, 60, 61, 83, 85, 87
	90	74,76,78,80,100,102,194	75, 77, 79, 101, 103, 105
8	48	34, 62, 〔64〕	35, *44, 46, 61, 63, 65
	54		*58, *62
	72	58, 86, 88, 90	56, 57, 59, 85, 87, 89
	84	66,(68),70,98,100,102,104	(68),(69),(71),(97),(99), (101)
	96	78, 82, 110, 112, 114	79, 80, 81, 83, 109, 111, 113

注：（1）表中有*号者，经生产实践证明性能较好，应优先选用；（2）圆括弧中的槽数，具有较坏的起动性能；（3）方括弧中的槽数，不能在制动情况下运行。

上述原则和表列数据不是绝对的。有时不符合表5-7的数值，运行性能也相当好，或者虽然不符合上述原则，但采取特殊措施后，电动机仍能正常运行。不过一般说来，假如不采取特殊措施，定转子槽配合违反了上述原则，那么，电动机的运行性能将会变坏，因此最好按照表5-7推荐的槽配合来选择改极的电动机。

（2）电动机的功率问题

改变电动机极数时，必须考虑到电动机功率将与转速近似地成正比变化，也就是说，当电动机由低速改高速时，电动机的容量可以提高；而由高速改低速时，电动机容量将相应减小。因此，在改变电动机极数时，要注意改制后的容量是否适合所配用的机器设备。

（3）铁心有关部分磁通密度的核算

一台正规设计的电动机，铁心磁路各部分的磁通密度，一般都是安排得比较合理的。这种合理性，主要体现在各部分的磁通密度都有一个适当的范围，使电动机能有较好的技术经济指标。如近年来生产的感应电动机（包括 J_2、JO_2 在内）定子铁心齿部磁密 B_t 一般在16000～17500Gs 之间，铁心轭部磁密 B_c 一般在12000～15000Gs之间。早年生产的电动机，各部分磁密低10%左右。

当电动机由少极改成多极（即高速改低速）时，由于极距减小，每极磁通也将减小，因此，定子轭部磁密将比较低，而定子铁心齿部磁密可能显得较紧张。当电动机由多极改成少极（即低速改高速）时，由于极距增大，每极磁通也将增大，因此，定子轭部磁密将比较紧张，而定子铁心齿部磁密可能比较宽裕。由此可知，电动机改变极数后，往往会出现某一部分磁密超出一般范围，甚至趋近于饱和状态。因此，在多极改少极时，必须核算轭部磁密；在少极改多极时，则必须核算齿部磁密。

1）定子齿磁密的核算

定子齿磁密 $$B_t = \frac{1.57\phi}{\frac{Z_1}{2p} b_t l \times 0.92} \quad (Gs)$$

式中 ϕ——每极磁通，按 $\phi = B_p \tau l = 0.637 B_\delta \tau l$ 计算；

Z_1——定子铁心槽数；

p——极对数；

b_t——定子齿的宽度(cm)；

l——定子铁心长度(cm)；

1.57——正弦波系数；

0.92——铁心叠压系数。

由少极改多极的电动机，利用上式计算出来的齿磁密B_t一般控制在18500Gs左右，最多不要超过22000Gs。如果计算出来的齿磁密过高，可适当增加线圈匝数，以减小B_δ和ϕ，使B_t降低到适当的数值。

2）定子轭磁密的核算

从图5-15可以看出不论N极或S极，在轭部磁通都是向左右分成对称的两路的。如果每极总磁通为ϕ，则轭部磁通为$\phi/2$，轭部磁密B_c为

$$B_c = \frac{\phi/2}{h_c l \times 0.92} = \frac{\phi}{1.84 h_c l} \quad (Gs)$$

式中 ϕ——每极磁通，按 $\phi = B_p \tau l = 0.637 B_\delta \tau l$ 计算；

h_c——定子轭高(cm)；

l——定子铁心长度(cm)；

0.92——铁心叠压系数。

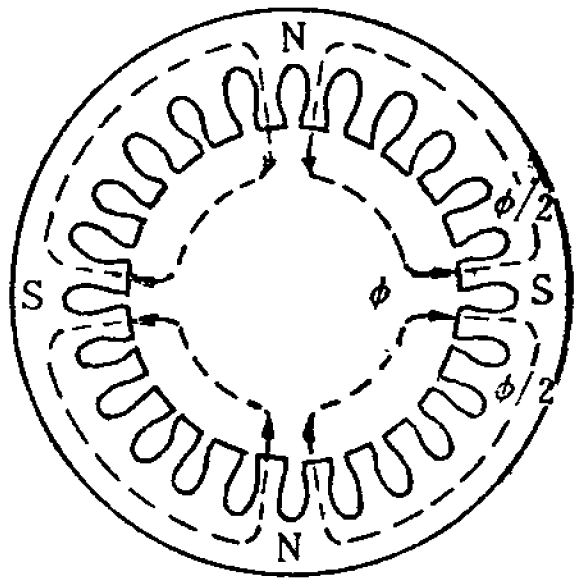


图5-15 定子轭部磁通

定子轭高h_c可以实测，也可以利用下式计算

梯形槽时：$$h_c = \frac{D_0 - D_i}{2} - h_s$$

梨形槽时：$$h_c = \frac{D_0 - D_i}{2} - h_s + \frac{R}{3}$$

式中 D_0——定子铁心外径(cm)；

D_i——定子铁心内径(cm)；

h_s、R——槽形尺寸，参看图5-10，单位为cm。

由多极改少极的电动机，利用上式计算出来的轭部磁密B_c可控制在15000Gs左右，最高不宜超过18000Gs。如果计算出来的B_c过高，也可适当增加线圈匝数，使B_c降低到适宜数值。

除齿磁密和轭磁密外，重绕所需的其余各项数据的计算均同前述。

但必须指出：感应电动机改变极数重绕线圈后，由于铁心各部分磁通密度不能都保持在恰当的范围内，因而，电动机的效率、功率因数、空载电流、起动电流、力矩和温升等技术性能都将有较大的变动。

例 4：今有一台JO-62-6型感应电动机，额定功率P_e= 7 kW，U_e= 380 V，Δ接法。定子外径D_0 = 327 mm，定子内径D_i = 210 mm，铁心长 l = 100 mm，极对数 p = 3，定子槽数Z_1 = 36，轭高h_c = 33 mm，双层绕组，每线圈匝数w_y = 14。如将其改为 4 极电动机，计算重绕所需数据及电动机功率，并将三相绕组改成正弦绕组。

（1）将 6 极电动机改为 4 极电动机

1）检查定转子槽配合　查明转子槽数Z_2 = 44，对照表5-7，直槽转子 4 极36/44的槽配合起动性能较坏。如现有转子为斜槽尚可采用。

2）相电压　$U_\varphi = \frac{U_e}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220$　（V）

3）极距　　$\tau = \frac{\pi D_i}{2p} = \frac{3.14 \times 21}{4} = 16.5$　(cm)

4）根据表5-4选取$B_\delta = 7500$Gs，每极磁通

$\phi = 0.637 B_\delta \tau l = 0.637 \times 7500 \times 16.5 \times 10$

$= 7.9 \times 10^5$(Mx)

5）因为是多极改少极，应核算轭部磁密B_c，

$$B_c = \frac{\phi}{1.84 h_c l} = \frac{7.9 \times 10^5}{1.84 \times 3.3 \times 10} = 13000 \quad (Gs)$$

计算得出的B_c值不甚高，说明所选取的B_δ值是可用的。

6）选用双层叠绕组，求绕组系数K_{dp}

由于$2p = 4$，$Z_1 = 36$，所以$\tau = \frac{Z_1}{2p} = \frac{36}{4} = 9$(槽)，$\frac{5}{6}\tau = 7.5$(槽)，取线圈节距$y = 7$，即跨距为1～8槽，查表5-3，得短距系数$K_p = 0.94$。

由于$q = \frac{Z_1}{2mp} = \frac{36}{2 \times 3 \times 2} = 3$，查表5-2，得分布系数$K_d = 0.96$。因此，绕组系数$K_{dp} = K_d \cdot K_p = 0.96 \times 0.94 = 0.903$。

7）计算每相串联匝数　因为电动机不大，取$K_E = 0.86$，则

$$w_1 = \frac{K_E U_\varphi \times 10^6}{2.22 K_{dp} \phi} = \frac{0.86 \times 220 \times 10^6}{2.22 \times 0.903 \times 7.9 \times 10^5} = 119 \quad (匝)$$

8）取并联支路数$a = 1$，计算每槽导体数

$$N_s = \frac{6 w_1 a}{Z_1} = \frac{6 \times 119 \times 1}{36} = 20$$

根据$N_s = 20$，重算每相串联匝数　$w_1 = \frac{N_s Z_1}{6a} = \frac{20 \times 36}{6 \times 1} = 120$。

9）每相线圈数为$\frac{Z_1}{3} = \frac{36}{3} = 12$(个)

10）每个线圈匝数为$w_y = \frac{3 a w_1}{Z_1} = \frac{3 \times 1 \times 120}{36} = 10$(匝)

11）确定导线尺寸

已知每槽导体数 N_s，可参照上面所述方法，测出槽有效面积后，可以求出导线直径。

如旧绕组未拆除和槽形面积未测出时，也可根据已算出的数据进行估算。

根据感应电动机型号JO-62-6可查出原6极时导线为单纱漆包线，线规为 $\begin{matrix}1-\phi 1.35\,mm\\1-\phi 1.45\,mm\end{matrix}$，其导线截面积为3.082mm²。

由于原来每个线圈匝数为14匝，而改制后每个线圈匝数为10匝，匝数减少了，导线截面积可以放大一些，放大的倍数与匝数减少的程度相对应，也就是放大 $\frac{14}{10}=1.4$ 倍。因此，改为4极后导线截面积为 $3.082\times1.4=4.3148mm^2$，可选用线规 $\begin{matrix}2-\phi 1.35mm\\1-\phi 1.40mm\end{matrix}$。

12）改为4极后电动机输出功率

由于导线截面积放大了1.4倍，电流与电动机功率也可增大1.4倍。原来为7 kW，因此，改成4极后的电动机功率约为

$$P_e=1.4\times 7=10\quad(kW)$$

（2）三相绕组改成正弦绕组

通过三相绕组改极计算已得原三相绕组数据：

定子槽数　$Z_1=36$

每槽导体数　$N_s=20$

导线线规　$\begin{matrix}2-\phi 1.35mm\\1-\phi 1.40mm\end{matrix}$

绕组型式　双层叠绕

接法　人

并联支路　$a=1$

现将三相绕组改成正弦绕组。

1）正弦绕组的排列

当每极每相槽数 $q=\frac{Z_1}{6p}=\frac{36}{6\times 2}=3$ =奇数时，正弦绕组可以为有轮换排列和不轮换排列。但这两种排列，槽电流沿圆周的分布都不是很理想的“正弦”分布。为了使正弦绕组的优越性得到充分的发挥，我们采用第三种排列方法，即取$q_{\triangle}=2$、$q_{人}=3$。绕组连接为延边三角形(△)接法。将定子槽分成上下两层，三角形部分绕组置于一层，星形部分绕组置于另一层，这样便形成了一种单双层混合绕组，如图5-16（见封2）所示。为了清楚起见，我们将三角形部分绕组和星形部分绕组展开图分别画出图5-17（见封3）和图5-18（见封4）。图中可以看出，三角形部分采用单层链式绕组，而星形部分则采用单层同心交叉式绕组。这样排列的绕组，节能效果相当好，而且小容量4极电机大多为36槽，所以这种绕组特别有实用意义。

2）正弦绕组的绕组数据的确定

为了使槽电流沿圆周呈正弦分布，首先必须确定星形部分和三角形部分每个线圈的匝数比。对于这种排列方法，可以让人部分$q_{人}=3$的三个线圈的匝数分别为$w_{人1}$、$w_{人2}$、$w_{人1}$，而△部分$q_{\triangle}=2$的线圈匝数都为$w_{\triangle}$。

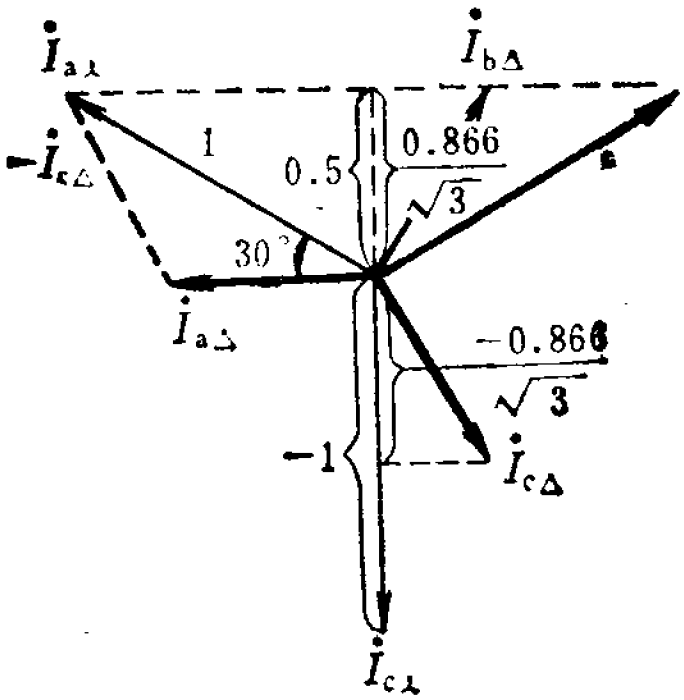
根据绕组排列及槽电流沿圆周按“正弦”分布时的每槽电流的相对值（图5-19），可以列出每槽电流（瞬时值）的方程：

对于第一槽　$0.5w_{人1}=0.1736w_{人2}$

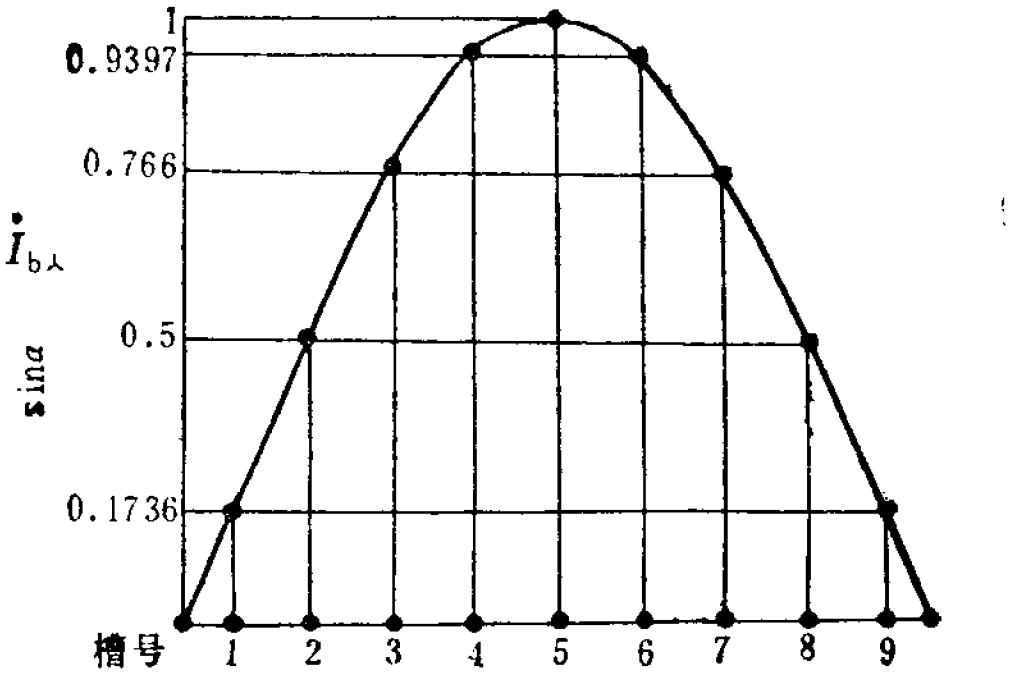
对于第二槽　$0.5w_{人2}=0.5w_{人2}$

对于第三槽　$\frac{0.866}{\sqrt{3}}w_{\triangle}+0.5w_{人1}=0.766w_{人2}$

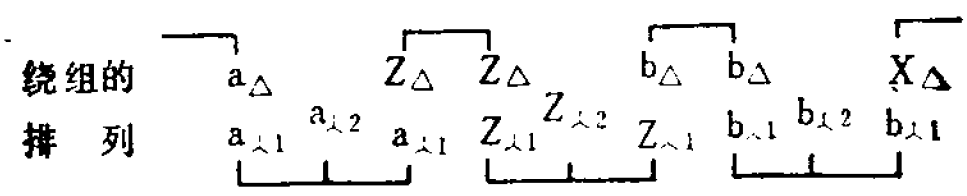
对于第四槽　$\frac{0.866}{\sqrt{3}}w_{\triangle}+w_{人1}=0.9397w_{人2}$



a）电流相量图



相位角α 0° 10° 30° 50° 70° 90° 110° 130° 150° 170° 180°



b）每槽电流瞬时值

图5-19　$q=3$ 按 $q_△=2$、$q_人=3$ 分布的正弦绕组的排列及槽电流分布

a）电流相量图　b）每槽电流瞬时值

对于第五槽　$w_{人2}=w_{人2}$

对于第六槽　$\dfrac{0.866}{\sqrt{3}}w_△+w_{人1}=0.9397w_{人2}$

对于第七槽　$\dfrac{0.866}{\sqrt{3}}w_△+0.5w_{人1}=0.766w_{人2}$

对于第八槽　$0.5w_{人2}=0.5w_{人2}$

对于第九槽　$0.5w_{人1}=0.1736w_{人2}$

由所列的联立方程组，可得出$w_{人1}$、$w_△$与$w_{人2}$的关系：

$$w_{人1}=0.3472w_{人2}$$

$$w_△=1.1848w_{人2}$$

因此可得　$w_{人2}:w_{人1}:w_△=1:0.3472:1.1848$

在电机修理中，只要确定$w_{人2}$，便可算得$w_{人1}$和$w_{△}$。

$w_{人2}$的确定：

由于原三相绕组为△连接，每槽导体数$N_s=42$。现采用人连接，根据正弦绕组简易计算公式可得

$$N_{人2}=0.94\times\frac{1}{\sqrt{3}}N_s=0.94\times\frac{1}{\sqrt{3}}\times 42=22.79$$

取　$N_{人2}=23$

因为△部分和人部分绕组均为单层绕组，每线圈匝数等于每槽导体数，故

$$w_{人2}=N_{人2}=23$$

而

$$w_{人1}=0.3472w_{人2}=8$$

$$w_{△}=1.1848w_{人2}=27$$

导线线规确定：

由于原三相绕组为△连接，导线线规为 $1-\phi 1.45\text{mm}$，其截面积为 $A_c=1.651\text{mm}^2$。现采用△连接，根据正弦绕组简易计算公式可得

人部分导线截面积　$A_{人}=\frac{1}{0.94}\times\sqrt{3}A_c=3.042\ (\text{mm}^2)$

选用线规　$2-\phi 1.40\text{mm}$

△部分导线截面积　$A_{△}=\frac{1}{0.94}A_c=1.756\ (\text{mm}^2)$

选用线规　$1-\phi 1.50\text{mm}$

附录　常用铜圈线规格表

直径 (mm)	截面积 (mm^2)	铜线		
		1 km的重量 (kg)	15℃时 1 km 的电阻值 (Ω)	75℃时 1 km 的电阻值 (Ω)
0.10	0.0079	0.070	2270	2810
0.11	0.0095	0.085	1813	2244
0.12	0.0113	0.101	1524	1890
0.13	0.0133	0.118	1296	1605
0.14	0.0154	0.137	1118	1385
0.15	0.0177	0.157	947	1168
0.16	0.0201	0.179	856	1057
0.17	0.0227	0.202	758	940.0
0.18	0.0255	0.226	674	835.0
0.19	0.0284	0.252	606	750.0
0.20	0.0314	0.279	548	683.0
0.21	0.0345	0.308	497	615.0
0.23	0.0415	0.369	415	514.0
0.25	0.0411	0.436	351	434.5
0.27	0.0573	0.509	300	371.5
0.29	0.0661	0.587	260	322.0
0.31	0.0755	0.671	228	282.5
0.33	0.855	0.760	201	248.5
0.35	0.0962	0.855	178.8	221.5
0.38	0.1134	1.008	151.8	188.0
0.41	0.1320	1.173	130.3	161.4
0.44	0.1521	1.352	113.2	140.2
0.47	0.1735	1.542	99.2	122.5
0.49	0.1886	1.676	91.3	112.5
0.51	0.204	1.812	84.4	104.5
0.53	0.221	1.975	77.7	96.3
0.55	0.238	2.12	72.3	89.2
0.57	0.255	2.27	67.5	83.6
0.59	0.273	2.42	63.0	78.0

（续）

直径（mm）	截面积（mm^2）	铜线		
		1 km的重量（kg）	15℃时 1 km的电阻值（Ω）	75℃时 1 km的电阻值（Ω）
0.62	0.302	2.68	56.9	70.6
0.64	0.322	2.86	53.4	66.2
0.67	0.353	3.13	48.7	60.5
0.69	0.374	3.32	46.0	57.0
0.72	0.407	3.62	42.3	52.5
0.74	0.430	3.82	40.0	49.7
0.77	0.466	4.14	39.6	45.8
0.80	0.503	4.47	34.2	42.4
0.83	0.541	4.81	31.8	39.4
0.86	0.581	5.16	29.6	36.7
0.90	0.636	5.66	27.0	33.5
0.93	0.679	6.04	25.3	31.4
0.96	0.724	6.43	23.8	29.5
1.00	0.785	6.98	21.9	27.2
1.04	0.849	7.55	20.3	25.2
1.08	0.916	8.14	18.79	23.4
1.12	0.985	8.75	17.47	21.7
1.16	1.057	9.40	16.28	20.2
1.20	1.131	10.05	15.22	18.9
1.25	1.227	10.91	14.02	17.4
1.30	1.327	11.80	12.96	16.1
1.35	1.431	12.73	12.01	14.9
1.40	1.539	13.69	11.18	13.9
1.45	1.651	14.68	10.41	12.9
1.50	1.767	15.71	9.14	12.1
1.56	1.911	16.99	9.00	11.15
1.62	2.06	18.32	8.36	10.45
1.68	2.22	19.71	7.75	9.62
1.74	2.38	21.1	7.23	8.97
1.81	2.57	22.9	6.70	8.32
1.88	2.78	24.7	6.19	7.68

本社出版的

有关电工的培训教材及自学用书
（部分）

技工学校机械类通用教材

电工基础（第二版）　　电工工艺学（第二版）

仪器仪表工人技术培训教材

电工基础　　电子技术基础

电工仪器仪表及其线路　　常用电工材料

电子仪器仪表装调工艺学　　非电量电测变换技术

工人技术教育读本

电工（修订本）　　电线电缆工艺学

机械工人学习材料

怎样安装与维修电灯　　怎样安装电力线路

机床电气线路维修　　怎样拆修电动机

单　行　本

电工考工应知题解（修订本）　　实用电子线路

异步电动机运行与维修　　同步发电机运行与维修

安装与维修电工技术　　值班电工技术

机床电气设备　　交流接触器直流运行技术

JEC-2集成电路应用实例　　机床的微机控制

日本松下电器公司职工培养教材

电学基础讲座（1～6册）

基础电工　第一册　直流电　第二册　磁与静电

第三册　交流电　第四册　电路

基础电子学　第五册　电子电路(一)　第六册　电子电路(二)